

Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Haissam Mouhasseb
aus Damaskus

Tag der mündlichen Prüfung:

25. Juli 2007

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller

Korreferenten:

Prof. Dr. rer.nat. H. Wiggenhauser

Korreferenten:

Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. M. Thumm

Zürich 2007

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung und Problemstellung	1
2	Lösungsansatz und Versuchskonzeption.....	4
3	Verfahrensgrundlagen.....	6
3.1	Einleitung.....	6
3.2	Analogie von mechanischen und dielektrischen Relaxationserscheinungen.....	7
3.3	Beschreibung des dielektrischen Phänomens	8
3.4	Dielektrische Eigenschaften von Wasser	12
3.4.1	Freies Wasser.....	12
3.4.1.1	Einfluss der Temperatur	13
3.4.1.2	Einfluss des Salzgehalts.....	15
3.4.2	Physikalisch gebundenes Wasser	17
3.4.3	Chemisch gebundenes Wasser	18
3.5	Dielektrische Eigenschaften von Feststoffen.....	19
3.6	Dielektrische Eigenschaften von Luft	19
3.7	Dielektrische Eigenschaften heterogener Substanzen	19
3.8	Einfluss von Materialinhomogenitäten.....	21
3.9	Einfluss der geometrischen Form der Einschließungen	22
4	Eigenschaften des Baustoffs Beton	24
4.1	Ausgangsstoffe.....	24
4.1.1	Zement.....	24
4.1.2	Betonzuschlag	24
4.2	Mikrostruktur von Zementstein und Beton	25
4.2.1	Porenstruktur und Porengrößenverteilung	26
4.2.2	Modifikationen des Wassers in Zementstein	26
4.2.3	Spezifische Oberfläche	27
4.3	Eigenschaften des Porenwassers.....	28
4.3.1	Relaxationszeit des Porenwassers in Zementstein	28
4.3.1.1	Einfluss der Temperatur auf die Relaxationszeit.....	28
4.3.1.2	Einfluss des Wassergehalts auf die Relaxationszeit	29
4.3.2	Relaxationszeit des Porenwassers in Beton.....	30
4.3.3	Viskosität	31
4.3.4	Chemische Zusammensetzung.....	32
5	Messverfahren und Auswertung der Messungen	35
5.1	Messprinzip	36
5.2	Gestaltung der Messsensoren und des Messaufbaus	38
5.3	Berechnung des elektromagnetischen Feldes der Sensoren	40

5.3.1	Mode-Matching Methode.....	40
5.3.2	Numerische Feldberechnungen mit MAFIA	44
5.4	Kalibration des Messsystems	47
5.5	Berechnung der komplexen Permittivitätszahl.....	50
5.6	Ermittlung des Wassergehalts	51
5.6.1	Integrale Messung mit einem Sensor	51
5.6.2	Messungen mit vier Sensoren zur Bestimmung eines Feuchteprofils	55
6	Experimentelle Untersuchungen.....	58
6.1	Übersicht zum Untersuchungsprogramm	58
6.2	Eigenschaften der untersuchten Betone.....	61
6.2.1	Betonzusammensetzung	61
6.2.2	Frischbetoneigenschaften.....	61
6.2.3	Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen	62
6.3	Physikalische Laboruntersuchungen	63
6.3.1	Bestimmung der Porosität.....	63
6.3.2	Bestimmung der spezifischen Oberfläche	64
6.3.2.1	Quecksilberdruckporosimetrie.....	64
6.3.2.2	Gasadsorption.....	65
6.3.2.3	Dielektrische Messung.....	66
6.4	Probenpräparation und Versuchsdurchführung	67
6.4.1	Untersuchungsparameter bei gleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor	67
6.4.1.1	Einfluss der Temperatur	68
6.4.1.2	Einfluss des Hydratationsgrads	69
6.4.1.3	Einfluss des Größtkorns des Betons	69
6.4.1.4	Einfluss des Bewehrungsgrads.....	69
6.4.2	Untersuchungsparameter bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor	70
6.4.2.1	Einfluss des Feuchtegehalts.....	70
6.4.2.2	Einfluss des Salzgehalts.....	73
6.4.2.2.1	Feuchte Vorlagerung.....	73
6.4.2.2.2	Trockene Vorlagerung.....	73
6.4.2.3	Einfluss der Nachbehandlungsdauer.....	73
6.4.3	Untersuchungsparameter bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integralen Messungen mit vier Sensoren.....	74
6.4.3.1	Einfluss des Feuchtegehalts.....	75
6.4.3.2	Einfluss des Salzgehalts.....	76
6.4.3.3	Einfluss der Nachbehandlungsdauer.....	76
7	Messergebnisse und Diskussion	77
7.1	Gleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integrale Messung mit einem Sensor	77
7.1.1	Einfluss der Temperatur.....	77
7.1.2	Einfluss des Hydratationsgrads	79
7.1.3	Einfluss des Größtkorns des Betons	81
7.1.4	Einfluss des Bewehrungsgrads.....	82

7.2	Ungleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integrale Messung mit einem Sensor	84
7.2.1	Einfluss des Feuchtegehalts.....	84
7.2.2	Einfluss des Salzgehalts	86
7.2.2.1	Feuchte Vorlagerung	86
7.2.2.2	Trockene Vorlagerung	89
7.2.3	Einfluss der Nachbehandlungsdauer	92
7.3	Ungleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integrale Messungen mit vier Sensoren	95
7.3.1	Einfluss des Feuchtegehalts.....	95
7.3.2	Einfluss des Salzgehalts	97
7.3.3	Einfluss der Nachbehandlungsdauer	98
7.3.4	Diskussion der Messergebnisse zur Erfassung des Feuchtegradienten.....	100
7.4	Statistische Auswertung.....	101
7.4.1	Statistische Auswertung mit Mittelwerten aus 12 Messungen.....	102
7.4.2	Statistische Auswertung mit Einzelmessungen	104
7.4.3	Abschätzung der Wassergehaltsstreuung in Beton	106
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	109
9	Ausblick.....	111
10	Literaturverzeichnis.....	114
11	Anhang	122

KURZFASSUNG

Die zerstörungsfreie Messung des Feuchtegehalts von mineralischen Baustoffen gehört seit vielen Jahren zu den Themen von vorrangigem wissenschaftlichem Interesse im Bauwesen bzw. Betonbau. Dementsprechend sind in der Vergangenheit zahlreiche verschiedene Messverfahren entwickelt worden, die heute der Praxis zur Verfügung stehen.

Eine kritische Wertung der angebotenen Messgeräte zeigt jedoch, dass trotz der erzielten Fortschritte nach wie vor Forschungsbedarf besteht, vor allem im Hinblick auf die Entwicklung solcher praxistauglicher Geräte, die eine schnelle und zuverlässige Feuchtemessung erlauben und gleichzeitig zu einem moderaten Preis erworben werden können.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges hochfrequentes Messverfahren zur zerstörungsfreien Wassergehaltsbestimmung von Festbeton entwickelt. Seine Erprobung und Weiterentwicklung versprach einen wesentlichen Beitrag zur genaueren zerstörungsfreien Ermittlung des Feuchtegehalts in Randzonen von Beton- und Mörteloberflächen zu liefern.

Wesentliche physikalische Merkmale des neuen Messverfahrens sind die Variation der Messfrequenz, die Erfassung des Real- und Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl, die Einbeziehung des Depolarisationsfaktors sowie die Berücksichtigung des physikalisch gebundenen Wassers und der Temperatur.

Die Alleinstellungsmerkmale des neuen Messverfahrens umfassen die Beschreibung des gesamten Systems durch die Definition von wenigen Parametern, die Isolation der Einflüsse des Salzgehalts, des physikalisch gebundenen Wassers sowie der Temperatur. Darüber hinaus können wichtige Information über den Salzgehalt bzw. den Salzgehaltgradienten ermittelt werden.

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten an Betonen, die unter definierten Feuchtebedingungen lagerten. Zur Herstellung der Betone wurde ein CEM I- und ein CEM III-Zement verwendet. Der Wasserzementwert der Betone betrug 0,45 bzw. 0,65 und das Größtkorn 8, 16 bzw. 32 mm. Die Feuchtemessungen erfolgten mit dem neuen dielektrischen Messverfahren und zum Vergleich auf gravimetrischem Weg, d.h. durch Trocknung der Proben bei 105 °C bis zu Gewichtskonstanz. Gemessen wurde an Proben, die unter verschiedenen Feuchtebedingungen lagerten bzw. trocknen konnten. Untersuchungsparameter waren dabei die Betontemperatur, das Größtkorn des Betons, der Bewehrungsgrad, der Salzgehalt, das Betonalter (Hydratationsgrad) und die Nachbehandlungsdauer. Bei ausgewählten Prüfserien wurde mit Oberflächensensoren unterschiedlichen Durchmessers gearbeitet, um damit die Möglichkeit zu erkunden, ob über die verschiedene Tiefenwirkung dieser Sensoren zerstörungsfrei ein Feuchteprofil bei Beton dielektrisch erfasst werden kann.

Die ermittelten Versuchsergebnisse zeigen, dass das neue Messverfahren den herkömmlichen dielektrischen Messverfahren überlegen ist. Gegenüber den bekannten dielektrischen, aber auch den Mikrowellen-Messverfahren, bei denen der Zusammenhang zum Feuchtegehalt durch eine vorhergehende materialspezifische Kalibrierung hergestellt werden muss, konnte bei dem neu entwickelten Verfahren auf eine derartige Kalibrierung verzichtet werden. Darüber hinaus wurden störende Einflüsse auf die Messgenauigkeit, wie der Einfluss des Salzgehalts des Betons, des physikalisch gebundenen Wassers oder der Temperatur, durch die neuartige Messmethodik ausgeschaltet.

Durch die neuartige Vorgehensweise und die Berücksichtigung des Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl sind keine Eichkurven erforderlich, um den Feuchtegehalt unterschiedlicher Betone zu erfassen. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass im Bereich der angewendeten Messfrequenzen von 100 bis 500 MHz, bei gleichbleibendem Feuchtegehalt des Betons, unterschiedliche Messsignale auftreten. Aus der Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften des Wassers in Abhängigkeit von der Frequenz kann dann, durch Anwendung einer Mischungsregel, auf den Wassergehalt geschlossen werden. Dabei wird das Messsignal durch die Parameter der Betonzusammensetzung (Bindemittelart, Bindemittelgehalt, w/z-Wert, Größtkorn bis 32 mm) sowie durch die Porosität, den Hydratationsgrad und die Nachbehandlungsdauer kaum beeinflusst. Höhere Bewehrungsgrade im Bereich der Messung ($> 0,4\%$) beeinträchtigen erwartungsgemäß das Messsignal so, dass keine exakte Feuchtebestimmung möglich ist.

Messungen mit vier Sensoren an einer Messstelle zur Bestimmung eines Feuchteprofils über dem Probenquerschnitt ergaben, dass das Feuchteprofil mit den dielektrischen Messungen bis zu einer Tiefe von 2 cm erfasst werden kann. Dies ist von wesentlicher Bedeutung, da sich insbesondere in diesem Bereich Feuchteänderungen eines Betonbauteils vollziehen, die folglich mit der eingesetzten Methode bestimmt werden können.

SUMMARY

Non-destructive measurement of water content in mineral building materials belongs since many years to the topics of prior scientific interest in civil engineering and concrete construction. Accordingly, numerous and various measuring methods have been developed, that are now available in practice.

A critical evaluation of the offered measuring devices shows however, that in spite of the achieved progress, there is still need in research, mainly in terms of development, for the practice suitable, measuring systems to permit quick and reliable measurement and at the same time for a moderate price.

From this background and within the scope of this dissertation a novel high frequency measurement method for non-destructive determination of water content in hardened concrete was developed. It's testing and further development promised a substantial contribution for more accurate determination of water content in the edge zone of concrete and mortar surfaces.

Significant physical characteristics of the novel measurement method are variation of measuring frequency, recording of both real and imaginary part of complex permittivity, inclusion of depolarization factor and consideration of physically bound water and temperature.

Sole characteristics of the new measuring method include the description of the whole system through definition of few parameters, the isolation of influences from salt content, physically bound water as well as temperature. Furthermore important information on salt content respectively salt content gradient can be estimated.

The experimental investigations have been carried out on concretes, which have been stored under defined moisture conditions. To prepare the specimen, a cement CEM I 32,5 R and CEM III/A 32,5 have been used. The water/cement ratio of the concretes was 0,45 respectively 0,65 and the maximum grain size was 8, 16 respectively 32 mm. The moisture measurements have been carried out with the new dielectric measuring method and gravimetrically for comparison, i.e. by drying of the samples at 105 °C up to weight constancy. Samples which have been stored under different moisture conditions respectively which could dry have been measured. Investigation parameters were concrete temperature, maximum grain size, reinforcement ratio, salt content, concrete age (degree of hydration) and duration of curing. On selected concrete specimen, measurements have been carried out with probes with various diameters to investigate the possibility whether different penetration depth of these probes could dielectrically estimate a moisture profile in concrete.

The results show, that the new measuring technique outplays the conventional dielectric measuring devices. Compared with known dielectric and micro wave measuring systems, in which the relation to the water content has to be created though a previous material specific calibration, such a calibration could be abandoned by the new developed method. Furthermore, interfering influences on the measuring precision such as salt content, physically bound water or temperature could be isolated.

Through this new approach and the consideration of imaginary part of the complex permittivity, no calibration curves are needed to record the moisture content of different concretes. The main reason therefore is that different measuring signals occur in the frequency range

used between 100 and 500 MHz by constant moisture content. Knowing the dielectric properties of water as a function of frequency, one can conclude the water content through implementation of a dielectric mixing model. Thereby the measuring signals are hardly affected through concrete constitution (bonding agent kind, bonding agent content, water/cement ratio, maximum grain size up to 32 mm) as well as through porosity, degree of hydration rate and duration of curing. High reinforcement ratio ($> 0,4\%$) affect as expected the measuring signals in such a way, that no precise moisture determination is possible.

Measurements with four probes with different penetration depth to determine a moisture profile over a concrete cross section result into the fact, that a moisture profile can be dielectrically estimated up to a depth of 2 cm. This is of great importance, since especially in this range moisture content changes in concrete constructions occur, which can consequently be determined with the used method.

meiner Mutter

meinem Vater

Manal

Marina Sarah

Lina Giuliana

Ali Adnan

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. S. Müller für die fachliche Betreuung der vorliegenden Dissertation und deren kritische Durchsicht sowie die menschliche Unterstützung, die mir während meiner gesamten Tätigkeit am Institut gewährt wurde.

Ebenfalls möchte ich Herrn Prof. Dr. rer.nat. H. Wiggenhauser für seine vielfältigen Anregungen und sein Interesse und für die Übernahme des Korreferats aufrichtig danken.

Herrn Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. M. Thumm möchte ich für die Übernahme des Korreferats sehr herzlich danken.

Ebenso gilt mein Dank an Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H. K. Hilsdorf für sein Interesse an dieser Arbeit und für seine großzügige Unterstützung und Förderung.

Mein herzlicher Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. A. Brandelik und Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Hübner für Ihre fachliche Betreuung im Bereich der Hochfrequenztechnik.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Instituts für Baustofftechnologie, insbesondere Herrn Dr.-Ing. R. Maliha und Herrn Dr.-Ing. U. Guse die in vielfältiger Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der Verfasser der vorliegenden Dissertation bedankt sich beim Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. über die positive Bewertung des Forschungskonzepts.

Die Untersuchungen wurden vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie gefördert. Hierfür sei auch der AiF herzlich gedankt.

Zürich, Juli 2007

Haissam Mouhasseb

1 Einführung und Problemstellung

Wasser ist eines der meist verbreiteten Moleküle in unserer Biosphäre. Der Wassergehalt beeinflusst in einem erheblichen Ausmaß die physikalischen, chemischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften vieler Materialien. Aus diesem Grunde verwenden viele Branchen der Industrie Trocknungs- und Befeuchtungsprozesse zur Änderung des Wassergehalts eines Materials. Auf unterschiedlichen Gebieten wie z. B. der Meteorologie, der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie und dem Umweltschutz wird die Frage nach dem Wassergehalt gestellt. Demzufolge hat die quantitative Bestimmung des Wassergehalts eine grundlegende Bedeutung für die Industrie sowie für Forschungslabore.

In der Bundesrepublik Deutschland wird zurzeit über 60 % des Gesamtbauvolumens für die Instandsetzung und den Erhalt von Gebäuden aufgewendet. Es ist bekannt, dass dabei der Hauptanteil der Bauschäden durch Feuchtigkeit verursacht wird [4]. Für die kostengünstige Durchführung von Sanierungskonzepten, aber auch zur Bestimmung der Schadensursache, ist es daher unerlässlich, den Feuchtegehalt schnell und möglichst zerstörungsfrei zu bestimmen.

Neben der ästhetischen Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes eines Bauwerks kann es durch Feuchtigkeit zu ernsthaften, sicherheitsgefährdenden Veränderungen der Materialeigenschaften kommen, die den Erhalt der Bausubstanz in Frage stellen ([4], [51], [75]). Deshalb kann Feuchtigkeit zu Recht als der Hauptfeind der Bausubstanz angesehen werden. Zusätzlich hat die Feuchte im Festbeton einen großen Einfluss auf betontechnologischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Schwinden und Kriechen. Da sich all diese Faktoren auf den Spannungszustand eines Bauwerks auswirken, ist eine zerstörungsfreie Messung der Feuchte dringend erforderlich [56].

Darüber hinaus können bei der Betonproduktion durch eine korrekte Feuchtemessung der Zuschlagstoffe erhebliche Kosten, verursacht durch die notwendige Zugabe von Zement, eingespart werden [56]. Die Feuchtemessung hat nicht nur bei Zuschlagstoffen zur Betonherstellung eine enorme Bedeutung. Die Kenntnis der Feuchte und der Hydratationsvorgänge in Betonplatten ermöglicht eine produktivitätssteigernde Reduzierung der Ausschalzeiten. Des Weiteren muss die Feuchtesituation z. B. beim Verlegen von Böden (Fliesen, Parkett, etc.) auf Estrichen, bei Beschichtungsmaßnahmen an Betonoberflächen und bei der Beurteilung der Korrosion an Bewehrungsstählen bekannt sein.

Zur Messung des Wassergehalts von Materialien und Stoffen wird heute eine Vielzahl von Verfahren angeboten. Bei den zerstörungsfreien Messverfahren und Messgeräten sind dies die elektrische Widerstandsmessung, dielektrische Messgeräte, Mikrowellengeräte, die Infrarot-Thermographie, das Neutronen-Messverfahren, die Messung mittels Gammastrahlen, die NMR-Methode (Nuclear Magnetic Resonance) und das Radar. All diese Verfahren und Geräte haben ihre spezifischen Mängel und Unsicherheiten und sind deshalb für die Praxis nur mit

gewissen Einschränkungen geeignet. Eine Klassifizierung der Feuchtemessverfahren ist in Bild 1.1 dargestellt. Demnach werden die Feuchtemessverfahren in direkte und indirekte Messverfahren unterteilt.

Direkte Feuchtemessverfahren beruhen meist auf der Trennung des Wassers vom Feststoff. Das im Stoff enthaltene Wasser wird mit direkten Methoden bestimmt. Sie zeichnen sich durch eine hohe Selektivität gegenüber der Feuchte aus und werden als Bezugsmethoden für indirekte Feuchtemessverfahren benutzt. Die Masse bzw. das Volumen des Wassers wird durch Verdampfen, Einfrieren, Destillieren oder chemisch bestimmt.

Bei indirekten Feuchtemessverfahren werden die vom Wassergehalt abhängigen Substanzeigenschaften gemessen. Diese Substanzeigenschaften bilden einen funktionalen Zusammenhang mit der Feuchte. Der Messwert der indirekten Verfahren wird nicht allein von der Feuchte, sondern auch von anderen Eigenschaften des Messgutes, wie Zusammensetzung, Temperatur, Struktur, Dichte oder Leitfähigkeit beeinflusst. Bei indirekten Messungen wird eine spezifische Kalibrierkurve benötigt. Indirekte Verfahren eignen sich gut für kontinuierliche Messungen bzw. für den Einsatz in Mess-, Steuer- und Regelsystemen. Sie bieten außerdem den Vorteil, dass bei Wiederholmessungen die Materialprobe nicht zerstört wird. Bei festen Stoffen werden zur Bestimmung der Feuchte vorwiegend spektrale Eigenschaften des Wassermoleküls sowie spezifische Eigenschaften von Wasserstoffkernen ausgenutzt. Dementsprechend ist eine Feuchtebestimmung mit Leitfähigkeitsverfahren, dem kapazitiven Verfahren, dem Mikrowellenverfahren, dem Infrarotverfahren, dem Kernspinresonanzverfahren, sowie dem Neutronenverfahren möglich. Andere Verfahren nutzen die Wirkung der Feuchte auf bestimmte Eigenschaften des Messgutes, wie die Änderung der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit. Messverfahren, die diese Eigenschaften nutzen, sind Ultraschallverfahren, radiometrische, thermische und hygrometrische Messverfahren.

Bisher sind sichere Aussagen zum Feuchtezustand im Wesentlichen zerstörenden Methoden vorbehalten, wie der Entnahme von Bohrkernen und deren Untersuchung im Labor oder aber der Messung mit dem CM-Gerät (Calciumcarbid-Verfahren), das ebenfalls Materialproben verlangt. Zuverlässige zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Feuchtemessgeräte und Messverfahren sind sehr teuer und für den Einsatz auf der Baustelle nicht geeignet. Die Messgenauigkeit der preiswerteren Verfahren ist umstritten, vor allem die Einflüsse von Salzen und der Umgebungstemperatur auf das Messergebnis sind nicht befriedigend geklärt. Daher ist die Entwicklung von preiswerten, zerstörungsfreien Prüfverfahren mit hoher Messgenauigkeit unter Verwendung einfacher, robuster Messtechnik von hohem Interesse für die Baupraxis.

Die auf dem Markt bislang angebotenen und in der Praxis häufig eingesetzten dielektrischen Messgeräte erfüllen bei weitem nicht die gewünschten und notwendigen Anforderungen bezüglich Handhabung, Leistungsprofil und Genauigkeit bei Feuchtemessungen. Die mit diesen Geräten vorgenommenen Messungen erfordern für jeden Baustoff eine aufwendige Kalibrierung, und die Messgenauigkeit ist stark vom oft unvermeidlich vorhandenen Salzgehalt eines Baustoffs abhängig. Weiterhin erlauben die heute verfügbaren Messgeräte weder eine Feuchtedifferenzierung bei höherer Durchfeuchtung, noch eine hinreichend genaue Angabe über die Feuchteverteilung in den oberflächennahen Randzonen. Beide Informationen sind aber häufig von großer Wichtigkeit.

Ein entscheidender, von der Praxis geforderter Fortschritt im Hinblick auf eine rationelle und kostengünstige Qualitätssicherung im Betonbau ist die Entwicklung eines kostengünstigen und leistungsfähigen Messgerätes für die zerstörungsfreie Ermittlung von Feuchtegehalten in Mörteln und Betonen. Ein vergleichbares Gerät ist am Markt bisher nicht erhältlich, obwohl der Bedarf hoch ist und verschiedene Bemühungen unternommen werden, eine geeignete Messtechnik zu entwickeln. Nach der Verfügbarkeit eines solchen Messgerätes werden insbesondere kleine und mittlere Betriebe, aber auch beratende Ingenieure, die sich teure, vergleichbar genau messende Verfahren nicht leisten können, das einfach zu handhabende Ge-

rät mit großem Nutzen bei vielfältigen Aufgaben einsetzen können. Hierdurch wird ein Beitrag zur Schadensverhütung und Qualitätssicherung geleistet.

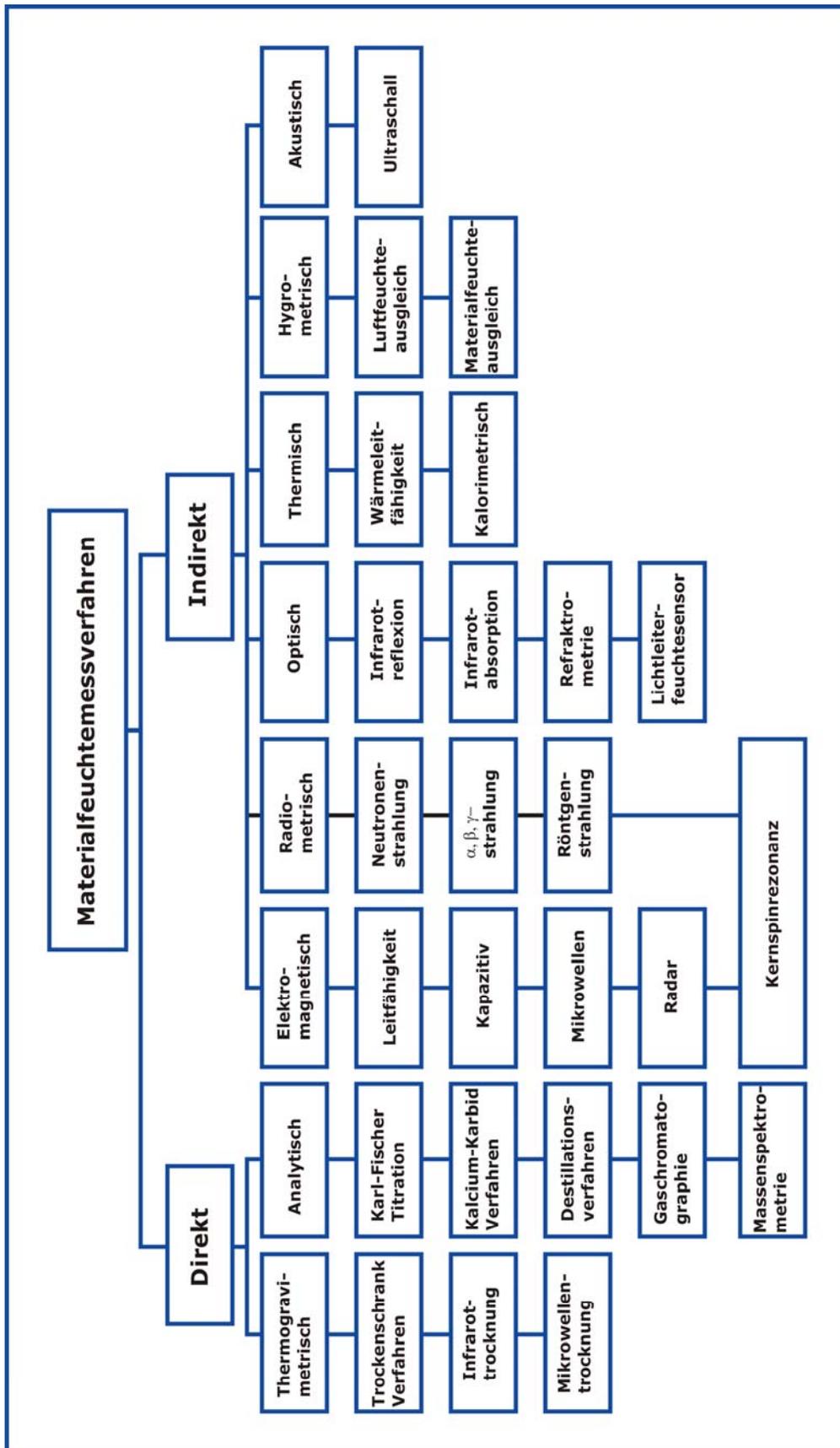


Bild 1.1: Klassifizierung der Materialfeuchtemessverfahren nach Kupfer [56]

2 Lösungsansatz und Versuchskonzeption

Die Ermittlung des Feuchtegehalts im Beton durch die Messung seiner dielektrischen Eigenschaften ist mittels verschiedener handelsüblicher Messgeräte seit vielen Jahren möglich. Diese Messgeräte arbeiten üblicherweise mit einer Frequenz und bestimmen entweder die Phasenverschiebung oder die Dämpfung der elektromagnetischen Welle bzw. den Realteil oder den Imaginärteil der Permittivitätszahl (auch Dielektrizitätskonstante bzw. Dielektrizitätszahl genannt; siehe DIN 1324 [27]) des Betons, die umso höher ausfallen, je feuchter der Beton ist. Zusätzlich zum Feuchtegehalt variieren Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in Abhängigkeit vom Salzgehalt und der Messfrequenz. Des Weiteren erfordern diese Verfahren in der Regel eine vorhergehende materialspezifische Kalibrierung, um aus dem Messsignal den Zusammenhang zum Feuchtegehalt herstellen zu können.

Die Kernidee des neuen Messverfahrens besteht darin, dass die Messfrequenz im Zuge eines Messvorgangs systematisch variiert und aus der Bestimmung der Phasenverschiebung und der Dämpfung der elektromagnetischen Welle die komplexe Permittivitätszahl des Betons errechnet wird. Durch Anwendung einer so genannten Mischungsregel, welche die ermittelte effektive Permittivität der heterogenen Mischung in Beziehung zu den dielektrischen Eigenschaften sowie den Volumenanteilen der einzelnen Komponenten setzt, kann auf den Wassergehalt rückgeschlossen werden. Hierdurch werden nicht nur die Probleme in Verbindung mit der unbekanntem und veränderlichen Zusammensetzung des Vierphasengemisches Feststoff, freies Wasser, physikalisch gebundenes Wasser und Luft gelöst, sondern es können zusätzlich die Einflüsse von Salzen und der Temperatur auf das dielektrische Verhalten des feuchten Baustoffes erfasst und berücksichtigt werden.

Die Messungen erfolgen im Frequenzbereich von 100 bis 500 MHz mit einem Abstand von 50 MHz (9 Frequenzen). Legt man nun der Auswertung der bei verschiedenen Frequenzen ermittelten Messparameter (Real- und Imaginärteil der komplexen Permittivitätszahl) das theoretische Modell von Polder-van Santen [76] zugrunde, so ergibt sich ein Gleichungssystem (bei 9 Messfrequenzen, 9 Gleichungen). Dieses kann nach den frequenzunabhängigen Parametern aufgelöst und damit der Wassergehalt des Betons errechnet werden.

Ein wesentliches Element des neuen Messverfahrens ist die Beschreibung des gesamten Systems durch die Definition von nur zwei Parametern. Diese sind die Permittivitätszahl der Feststoffphase ϵ_b und die Porosität θ .

Die Bestimmung der Permittivitätszahl der Feststoffphase kann an einer Probe mit bekanntem Wassergehalt durch eine einzige dielektrische Messung bestimmt werden. Zugleich kann eine unbekanntem Porosität durch einfache Labormessungen ermittelt werden. Diesen beiden Parametern unterliegen bei Beton vergleichsweise geringe Schwankungen, so dass durch

Annahme realistischer Mittelwerte dieser Parameter das Messergebnis nur unwesentlich beeinflusst wird.

Das neue Messverfahren wurde anhand umfangreicher experimenteller Untersuchungen entwickelt bzw. validiert.

Die dielektrischen Messungen und die dem Vergleich dienenden gravimetrischen Feuchteanalysen wurden an Betonen mit verschiedener Zusammensetzung durchgeführt. Dabei lagerten die Proben sowohl unter definierten Laborbedingungen als auch im Freien.

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden 10 verschiedene Betone unter Verwendung eines CEM I- bzw. CEM III-Zements mit Wasserzementwerten von 0,45 und 0,65 und einem Größtkorn von 8; 16 und 32 mm hergestellt (siehe Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5).

Bei den Feuchtemessungen wurde der Einfluss mehrerer Parameter studiert. Untersuchungsparameter waren dabei die Betontemperatur, das Größtkorn des Betons, der Bewehrungsgrad, der Salzgehalt, das Betonalter (Hydratationsgrad) und die Nachbehandlungsdauer.

Bei ausgewählten Prüfserien wurde mit Oberflächensensoren unterschiedlichen Durchmessers gearbeitet, um damit die Möglichkeit zu erkunden, ob über die verschiedene Tiefenwirkung dieser Sensoren zerstörungsfrei ein Feuchteprofil bei Beton dielektrisch erfasst werden kann. Die Messungen erfolgten in unterschiedlichem Alter während eines Zeitraumes von bis zu 1 Jahr.

3 Verfahrensgrundlagen

3.1 Einleitung

Unter einem Dielektrikum versteht man jeden Stoff, der Träger elektrischer Felder sein kann, d. h. dessen Leitfähigkeit hinreichend klein ist. Das Verhalten eines Dielektrikums im elektromagnetischen Feld wird makroskopisch durch die komplexe Permittivitätszahl ε_r (auch Dielektrizitätszahl genannt), die komplexe magnetische Permeabilitätszahl μ_r und die elektrische Leitfähigkeit κ charakterisiert. Die dielektrischen Eigenschaften eines Mediums können als Antwort dieses Mediums auf ein von außen angelegtes elektrisches Feld verstanden werden. Die dielektrischen Eigenschaften von Beton in schwachen elektrischen Wechselfeldern können durch die Angabe der komplexen Permittivitätszahl ε_r und der elektrischen Leitfähigkeit κ nach Gleichung (3.1) beschrieben werden, wobei die magnetische Permeabilitätszahl zu $\mu_r \approx 1$ angenommen werden kann:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j \cdot \left(\varepsilon_r'' + \frac{\kappa}{\omega \cdot \varepsilon_0} \right) \quad (3.1)$$

mit:

- ε_r komplexe Permittivitätszahl
- ε_r' Realteil der Permittivitätszahl
- ε_r'' Imaginärteil der Permittivitätszahl
- κ elektrische Leitfähigkeit [A/Vm]
- ω Kreisfrequenz [1/sec]
- ε_0 elektrische Feldkonstante, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

Die Permittivitätszahl ε_r und die elektrische Leitfähigkeit κ können durch Messung der Kapazität und des Leitwerts zwischen zwei Elektroden bestimmt werden. In Bild 3.1 sind die dielektrischen Eigenschaften von Beton als Kapazität und Widerstand dargestellt.

Elektrische und magnetische Felder in Materie führen zu einer Wechselwirkung mit den atomaren Bausteinen (Polarisation), so dass sich die im Material herrschende elektrische bzw. magnetische Feldstärke von der äußeren Feldstärke unterscheidet. Diese Wechselwirkungen werden durch die so genannten *Materialgleichungen* beschrieben (Gleichungen 3.2 bis 3.4).

Die gesamten elektrischen und magnetischen Erscheinungen (Elektrodynamik) werden in vier *Differentialgleichungen* zusammengefasst, welche die Feldgrößen \vec{E} , \vec{D} , \vec{H} und \vec{B} miteinander verknüpfen (Maxwellsche Gleichungen), wobei \vec{E} die elektrische Feldstärke in [V/m], \vec{D} die elektrische Flussdichte (Verschiebung) in [As/m²], \vec{H} die magnetische Feldstärke in [A/m] und \vec{B} die magnetische Flussdichte (Induktion) sind. Zur Lösung der Maxwellschen Gleichungen sind die oben erwähnten *Materialgleichungen* erforderlich. Die Maxwellschen Gleichungen beinhalten bereits die endliche Geschwindigkeit der Informationsausbreitung (Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit c).

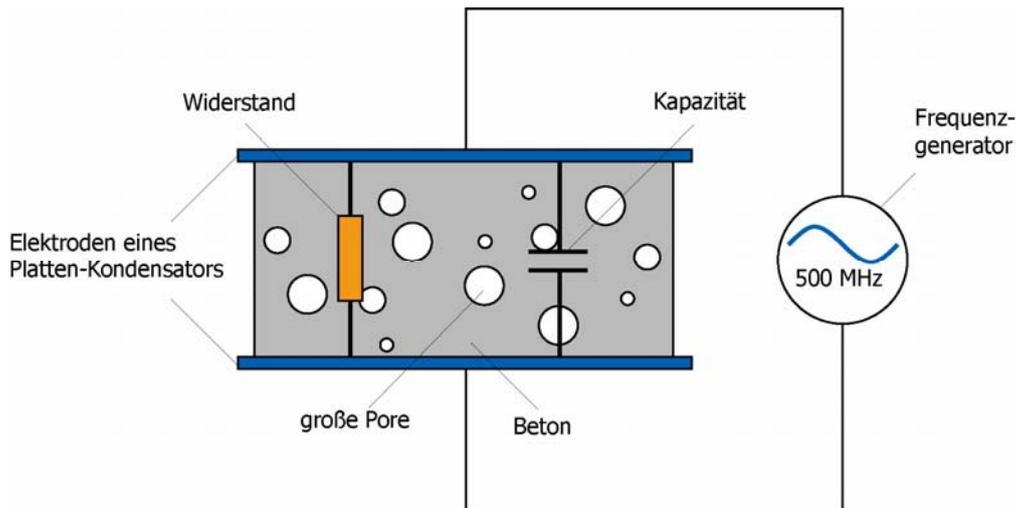


Bild 3.1: Dielektrische Eigenschaften von Beton dargestellt als Kapazität und Widerstand nach van Beek & Hilhorst [92]

3.2 Analogie von mechanischen und dielektrischen Relaxationsercheinungen

Die Physik beschreibt die Dehnung eines Körpers, die aufgrund einer Spannung entsteht, durch das *Hookesche* Gesetz:

$$\sigma = \xi \cdot M \quad (3.2)$$

wobei σ die Spannung [N/mm²], ξ die Dehnung [-] und M der Elastizitätsmodul [N/mm²]. Im Bereich der Technik wird Gleichung (3.2) oft auch mit $\sigma = \varepsilon \cdot E$ beschrieben. Dies beinhaltet jedoch eine Verwechslungsgefahr mit den elektrodynamischen Kenngrößen ε und E (vgl. Gl. (3.3)).

Gleichung (3.2) gilt streng nur für den statischen Fall und enthält keinerlei Aussagen darüber, zu welchem Zeitpunkt nach Anlegung der mechanischen Spannung die Beziehung für die Dehnung erfüllt ist, zumal in praktisch allen Fällen die Einstellung der genannten Größen eine messbare Zeit erfordern.

Dehnt man ein Stück Kautschuk vom ursprünglich spannungsfreien Zustand sehr schnell auf eine neue Länge aus, so beobachtet man unmittelbar nach der Dehnung eine Maximalspannung σ_{\max} . Im Laufe der Zeit sinkt diese Spannung ab und nähert sich dem konstanten Wert σ_0 , der durch das *Hookesche* Gesetz gegeben ist. Speziell diesen Vorgang des Absinkens der

ursprünglich sich einstellenden Maximalspannung auf dem *Hookeschen* Gesetz entsprechenden Wert nennt man in der Physik Relaxation.

Ein Maß für die Einstellungsgeschwindigkeit der Endzustände ist die so genannte Relaxationszeit.

Relaxation bezeichnet die Entspannung nach einer Anspannung. Physikalische Systeme kehren nach einer äußeren Störung über Relaxationsprozesse in ihren Grundzustand zurück.

Als Relaxationszeit bezeichnet man eine Zeitkonstante, die für einen gegebenen Relaxationsprozess charakteristisch ist.

3.3 Beschreibung des dielektrischen Phänomens

Das Zusammenwirken der elektromagnetischen Felder und Wellen mit der Materie wird makroskopisch durch die Permittivität ε in [Vs/Am], die Permeabilität μ in [As/Vm] und die elektrische Leitfähigkeit κ in [A/Vm] durch die Materialgleichungen charakterisiert:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.4)$$

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (3.5)$$

Dabei ist \vec{D} die elektrische Flussdichte (Verschiebung) in [As/m²], \vec{E} die elektrische Feldstärke in [V/m], \vec{B} die magnetische Flussdichte (Induktion) in [Vs/m²], \vec{H} die magnetische Feldstärke in [A/m] und \vec{J} die Stromdichte in leitenden Materialien in [A/m²] [67].

Bei einer sinusförmigen Zeitabhängigkeit der Feldgrößen können dielektrische und magnetische Materialien durch komplexe Materialgrößen beschrieben werden. Diese sind die komplexe Permittivitätszahl ε_r , und die komplexe Permeabilitätszahl μ_r . Sie werden wie folgt definiert [27]:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.6)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.7)$$

Dabei sind $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ [As/Vm] die elektrische und $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ [Vs/Am] die magnetische Feldkonstante. Bei Stoffen, die keine Ferromagnetika (Eisen, Kobalt, Nickel) enthalten, beträgt die Permeabilitätszahl $\mu_r \approx 1$. Die elektrischen Eigenschaften feuchter Baustoffe in schwachen elektrischen Wechselfeldern können somit durch die Angabe von der Permittivitätszahl ε_r und der elektrischen Leitfähigkeit κ ausreichend beschrieben werden.

Die sehr geringe Leitfähigkeit eines dielektrischen Materials ist darauf zurückzuführen, dass praktisch die gesamten elektrischen Ladungen durch das elektrische Feld ihrer Atomkerne fest gehalten werden und sich deswegen unter dem Einfluss eines von Außen angelegten elektrischen Feldes nicht frei bewegen können. Dem gegenüber kann sich in Metallen unter Einfluss eines angelegten elektrischen Feldes etwa ein Elektron pro Atom frei fortbewegen und somit eine Leitfähigkeit nachgewiesen werden. Ein elektrisches Feld \vec{E} bewirkt eine

leichte Verlagerung der positiven und negativen Ladungen eines Dielektrikums relativ zu einander. Auf dieser Weise erhält jedes Atom bzw. Molekül ein elektrisches Dipolmoment parallel zu und in der gleichen Richtung des Feldes \vec{E} . Dieser Effekt wird als dielektrische Polarisation \vec{P} bezeichnet und wird definiert als das elektrische Dipolmoment pro Volumeneinheit, wobei \vec{P} generell proportional zu \vec{E} ist:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \cdot \chi_e \cdot \vec{E} \quad (3.8)$$

mit $\chi_e = \epsilon_r - 1$ als elektrische Suszeptibilität.

Im materiegelüllten Raum kann die elektrische Flussdichte \vec{D} in einem Anteil $\epsilon_0 \cdot \vec{E}$, der aus dem angelegten elektrischen Feld \vec{E} im Vakuum resultiert und einem Anteil \vec{P} der elektrischen Polarisation, der von der Materie herrührt, aufgeteilt werden:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (3.9)$$

Die elektrische Flussdichte \vec{D} eines Dielektrikums ergibt sich folglich aus den Gleichungen (3.8) und (3.9) zu:

$$\vec{D} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (3.10)$$

Die makroskopische Polarisation \vec{P} resultiert aus der Summe von n Molekulardipolmomenten pro Volumeneinheit mit einem mittleren elektrischen Dipolmoment \vec{p} :

$$\vec{P} = n \cdot \vec{p} \quad (3.11)$$

Das auf dem Molekül wirkende lokale elektrische Feld \vec{E}' ist dem mittleren elektrischen Dipolmoment \vec{p} proportional, so dass:

$$\vec{p} = \delta \cdot \vec{E}' \quad (3.12)$$

wobei δ die Polarisierbarkeit des Moleküls.

Die Anzahl der Moleküle pro Volumeneinheit n in Gleichung (3.11) ist gleich:

$$n = \frac{N \cdot \rho}{M} \quad (3.13)$$

mit N = Avogadrozahl ($N=6,0221415 \cdot 10^{23}$ [mol⁻¹]), ρ = Dichte und M = Molekulargewicht.

Das lokale elektrische Feld \vec{E}' ist in diesem Zusammenhang gültig und kann durch die Mosotti Gleichung angegeben werden [12]:

$$\vec{E}' = \frac{\epsilon_r + 2}{3} \cdot \vec{E} \quad (3.14)$$

Die nötige Verknüpfung zwischen der makroskopischen und der mikroskopischen Beschreibung des dielektrischen Phänomens ergibt sich aus der Clausius-Mosotti Gleichung durch einsetzen von \vec{P} aus Gleichung (3.8), n aus Gleichung (3.13), \vec{p} aus Gleichung (3.12) und \vec{E}' aus Gleichung (3.14) in Gleichung (3.11):

$$\frac{N \cdot \delta}{3 \cdot \epsilon_0} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cdot \frac{M}{\rho} \quad (3.15)$$

Zur Molekularpolarisierbarkeit δ tragen die folgenden ausgeprägten Mechanismen bei [12]:

- die elektronische Polarisierbarkeit δ_e
- die atomare Polarisierbarkeit δ_a
- die Polarisierbarkeit durch Dipolorientierung δ_d
- die Polarisierbarkeit durch Ladungsdoppelschichten oder Kolloidteilchen δ_c
- die Polarisierbarkeit durch Grenzflächen δ_i .

Die negativ geladenen Elektronen der einzelnen Atome und Moleküle werden in einem angelegten elektrischen Feld \vec{E} relativ zu den schwereren positiv geladenen Atomkerne und in der entgegengesetzten Richtung von \vec{E} leicht verschoben. Infolgedessen erfährt jedes Molekül ein mittleres Dipolmoment \vec{p}_e , welches in Beziehung zur elektronischen Polarisierbarkeit δ_e nach Gleichung (3.12) steht.

Wenn sich Atome zu Kristallen zusammenschließen, verteilen sich die Ladungen der Atome in einer unsymmetrischen Weise, da sich die Valenzelektronen in der Region der chemischen Bindung befinden. Somit verursacht ein von außen angelegtes elektrisches Feld \vec{E} eine Verzerrung der normalen Ladungsverteilung und damit eine relative Verschiebung. Folglich erfährt jedes Molekül ein mittleres Dipolmoment \vec{p}_a , welches ebenfalls in Beziehung steht zur atomaren Polarisierbarkeit δ_a .

Neben der elektronischen und atomaren Polarisierbarkeit kommt bei polaren Dielektrika, die aufgrund der unsymmetrischen Ladungsverteilung ihrer Moleküle ein permanentes Dipolmoment besitzen, ein zusätzlicher Effekt hinzu. Die permanenten Molekulardipole tendieren dazu, sich in Richtung des angelegten elektrischen Feldes \vec{E} auszurichten. Die Polarisierbarkeit δ_d , verursacht durch die Dipolorientierung, ist umgekehrt proportional zu der thermischen Bewegung des Moleküls [12]:

$$\delta_d = \frac{\mu_d^2}{3 \cdot k \cdot T} \quad (3.16)$$

mit μ_d = Dipolmoment, k = Boltzmann-Konstante ($k=1,3806505 \cdot 10^{-23}$ [J/K]) und T = absolute Temperatur.

Bei kolloidalen Systemen entsteht aufgrund eines angelegten elektrischen Feldes \vec{E} eine Ladungsverschiebung der elektrischen Doppelschicht. Die entstehende Polarisierbarkeit δ_c ist proportional zur Ionenkonzentration, Oberflächenmobilität der Ionen und der Temperatur und umgekehrt proportional zum Radius des Kolloidpartikels [83].

Die elektronische und atomare Polarisierbarkeit δ_e , δ_a sowie die Polarisierbarkeit der Dipolorientierung δ_d und der Ladungsdoppelschicht δ_c werden infolge von Verschiebungen an gebundenen Ladungen hervorgerufen. Eine Fortbewegung von Ladungsträgern würde eine Erhöhung der Leitfähigkeit bewirken. Dieser Effekt kommt bei fast allen Dielektrika vor, da der elektrische Widerstand nie unendlich ist. Bei heterogenen Materialien jedoch kann es zu einer Bewegungseinschränkung der in den Zwischenschichten der unterschiedlichen Kompo-

nenten des Dielektrikums eingeschlossenen Ladungsträger kommen. Dieser Effekt trägt zusätzlich zur makroskopischen Polarisierbarkeit bei und wird Polarisierbarkeit durch Grenzflächen δ_i (Maxwell-Wagner-Effekt) genannt [12], [46], [89].

Demzufolge ergibt sich die Gesamtpolarisierbarkeit δ aus der Summe der unterschiedlichen Polarisierbarkeiten zu:

$$\delta = \delta_e + \delta_a + \delta_d + \delta_c + \delta_i \tag{3.17}$$

Jede Art der dielektrischen Polarisation ist durch eine Relaxationszeit τ , definiert als die erforderliche Zeit, um einen elektrischen Feld \vec{E} zu folgen, charakterisiert. Die elektronische Polarisation stellt sich in einer Zeit von $\tau_e \sim 10^{-16}$ sec. sehr schnell ein. Die wesentlich schwereren Atome sind etwas langsamer und brauchen ca. $\tau_a \sim 10^{-12} - 10^{-13}$ sec. Die Relaxationszeit τ_d der Dipolorientierung in polaren Dielektrika hängt von der Temperatur und der Viskosität ab und liegt gewöhnlich bei $\tau_d \sim 10^{-3} - 10^{-12}$ sec. Die Polarisation in kolloidalen Systemen dominiert bei Frequenzen kleiner 100 kHz, was einer Relaxationszeit von $\tau_c > 10^{-6}$ sec. entspricht [49]. Die Relaxationszeit τ_i hängt von der Leitfähigkeit und der Heterogenität des Dielektrikums ab und beträgt generell $\tau_i \sim 1 - 10^{-3}$ sec.

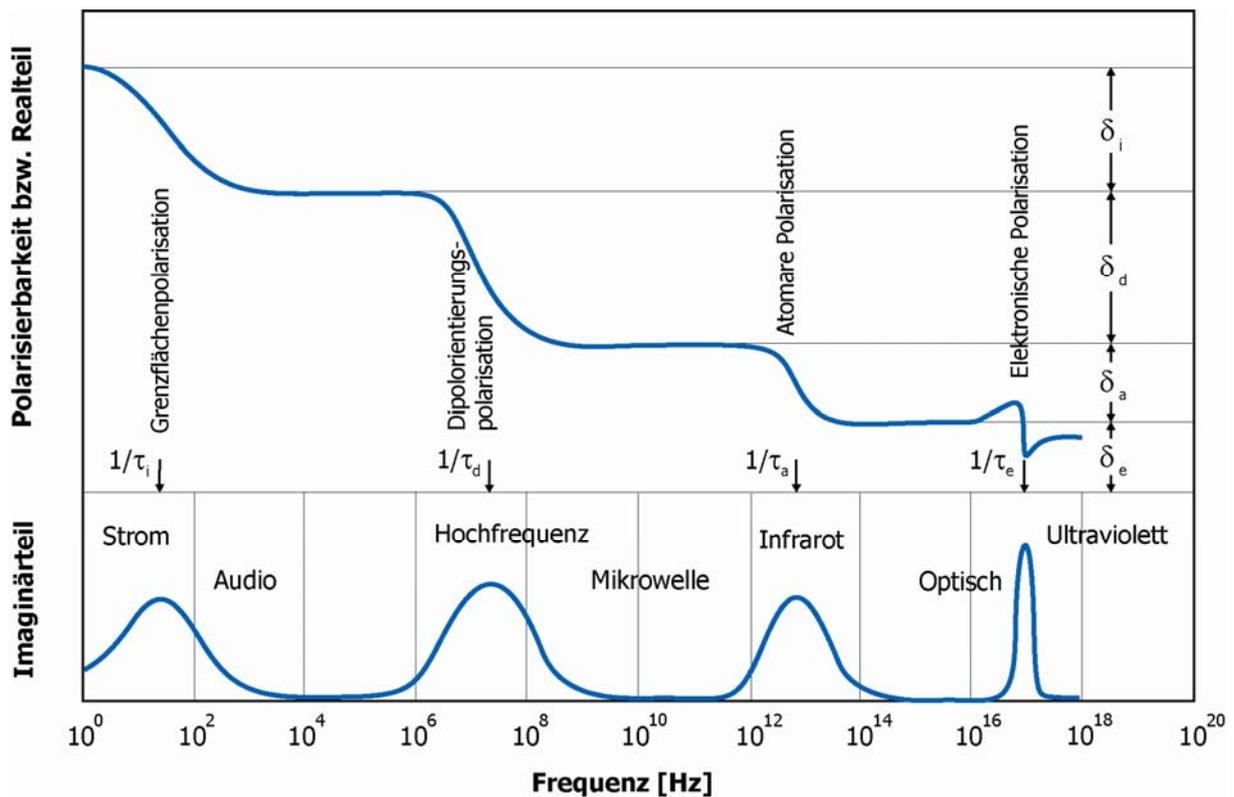


Bild 3.2: Spektrale Verteilung der unterschiedlichen Polarisationsmechanismen nach Birks [12]

Im Einfluss eines elektrischen Wechselfeldes \vec{E} kann jede Art der Polarisation ihren vollen Beitrag leisten, solange die Schwingperiode des Feldes $t = 1/f$ ($f =$ Frequenz) größer als die Relaxationszeit τ ist. Da generell $\tau_i > \tau_c > \tau_d > \tau_a > \tau_e$ ist, nimmt ihr Beitrag zur Polarisation in der angegebenen Reihenfolge mit zunehmender Frequenz ab. Dieses Verhalten ist in Bild 3.2 demonstriert ([12], [18], [39], [46], [89]).

3.4 Dielektrische Eigenschaften von Wasser

Das Wassermolekül besteht aus einer chemischen Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff. Die Strukturformel lautet H_2O und das Molekulargewicht beträgt 18. In Bild 3.3 ist das Wassermolekül schematisch nach Bjerrum [13] dargestellt. Die Umlaufbahnen der Elektronen des Moleküls bilden ein kugelförmiges und vier keulenförmige Elektronenorbitale. Die Winkel zwischen den vier keulenförmigen Orbitalen liegen bedingt durch die gegenseitige Abstoßung bei $104,5^\circ$. Der mittlere O-H Abstand beträgt ca. $0,96 \text{ \AA}$. Das relativ kleine Wassermolekül mit einem Durchmesser von ca. 3 \AA liegt in der Größenordnung eines Atoms. Es kann deshalb sehr gut in kleinste Poren eindringen und sich infolge seiner hohen Bindungsenergie sehr fest an Stoffe anlagern. Das Wassermolekül besitzt einen unsymmetrischen Aufbau und zwei entgegengesetzt geladene Seiten. Damit ist das Wassermolekül als Ganzes gesehen zwar elektrisch neutral, die Ladungsverteilung im Molekül aber ungleichmäßig. Es entsteht eine Polarität mit einem permanenten elektrischen Dipolmoment von $\mu_d = 1,84 \cdot 10^{-20} \text{ Asm}$. Diese extrem hohen Dipolkräfte sind unter anderem Ursache für die hohe Permittivitätszahl des Wassers. Diese besonderen Eigenschaften des Wassermoleküls begünstigen das messtechnische Erfassen von Wasser im Verband anderer Stoffe und bieten eine ausgezeichnete Möglichkeit, die Feuchte mittels hochfrequenter Messverfahren zu bestimmen.

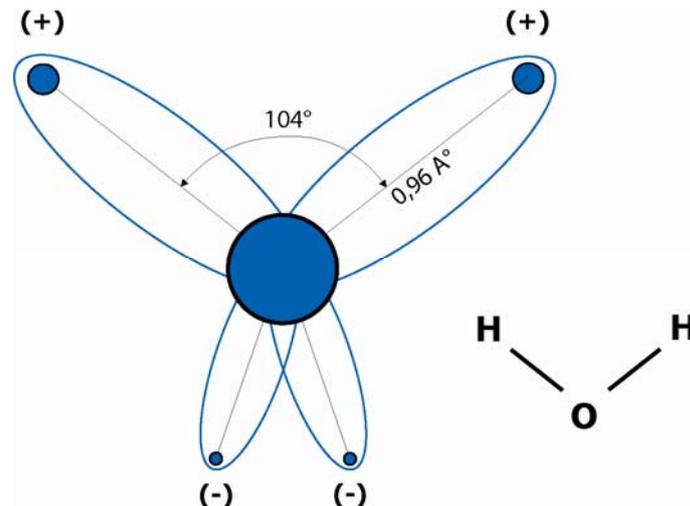


Bild 3.3: Schematische Darstellung eines Wassermoleküls nach Bjerrum [13]

Wasser kann durch ein Spektrum unterschiedlicher Bindungsarten und Bindungsfestigkeiten mit einem Feststoff in Wechselwirkung treten. Dabei unterscheidet man vereinfachend zwischen freiem, physikalisch und chemisch gebundenem Wasser.

3.4.1 Freies Wasser

Freies Wasser, welches mit keinem anderen Material in Wechselwirkung steht, ist eine statistische und temperaturabhängige Zusammenstellung von 0-, 1-, 2-, 3- und 4-fach gebundenen Molekülen. Jedes Molekül versucht sich, wie bei Eis, an vier Nachbarmolekülen zu binden, wobei sich diese Bindungen im Gegensatz zu Eis ständig brechen und neu bilden [47]. Damit eine Ausrichtung im elektrischen Feld erfolgen kann, muss bei diesen Molekülen mindestens eine Wasserstoffbrücke gebrochen werden [13].

Freies Wasser zeichnet sich durch besonders große Orientierungspolarisierbarkeit aus. Seine Permittivitätszahl wurde häufig und bei verschiedenen Frequenzen gemessen ([72], [52]). Die Frequenzabhängigkeit der Permittivitätszahl des Wassers ist typisch für einen einfachen

(Debyeschen) Relaxationsprozess. Seine Relaxationszeit τ kann in Abhängigkeit vom Radius des Wassermoleküls r , von der Viskosität des Wassers η und der absoluten Temperatur T beschrieben werden. Die Debyesche Relaxationstheorie verknüpft die Relaxationszeit für ein kugelförmiges Wassermolekül mit der Viskosität wie folgt [18]:

$$\tau = \frac{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r^3}{k \cdot T} \quad (3.18)$$

Dabei ist k die Boltzmann-Konstante $k = 1,3806505 \cdot 10^{-23}$ [J/K]).

3.4.1.1 Einfluss der Temperatur

Das Relaxationsverhalten des freien Wassers kann aufgrund der Orientierungspolarisation durch die allgemeine Cole-Cole-Gleichung beschrieben werden [72]. Dabei ist der Einfluss gelöster Ionen durch ihre Leitfähigkeit κ berücksichtigt:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j \cdot \omega \cdot \tau)^{1-\alpha}} - j \cdot \frac{\kappa}{\omega \cdot \varepsilon_0} \quad (3.19)$$

Der Kurvenverlauf wird durch die einzelnen, so genannten Cole-Cole Parameter festgelegt, wobei diese die folgenden Bedeutungen haben:

- ε Komplexe Permittivitätszahl des Wassers in Abhängigkeit der Frequenz
- ε_{∞} Optische Permittivitätszahl. Sie charakterisiert die Permittivitätszahl bei sehr hohen bzw. optischen Frequenzen ($\varepsilon_{\infty} = 4,5$)
- ε_s Statische Permittivitätszahl. Sie beschreibt die Permittivitätszahl bei sehr niedrigen Frequenzen. Dieser Wert ist von der Temperatur und der Leitfähigkeit abhängig.
- ε_0 Elektrische Feldkonstante in [As/Vm]
- ω Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ in [1/sec]
- τ Relaxationszeit in [sec]
- α Empirische Konstante ($\alpha = 0,02$), welche die Breite des Dispersionsgebietes kennzeichnet
- κ Ionische Leitfähigkeit in [A/Vm]

Nyshadham et al. [72] haben die Cole-Cole Parameter für deionisiertes Wasser ($\kappa = 0$) mit hoher Genauigkeit ermittelt. Mit diesen Parametern lassen sich Realteil ε' und Imaginärteil ε'' der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz berechnen und bei unterschiedlichen Temperaturen, wie in Bild 3.4 gezeigt, darstellen.

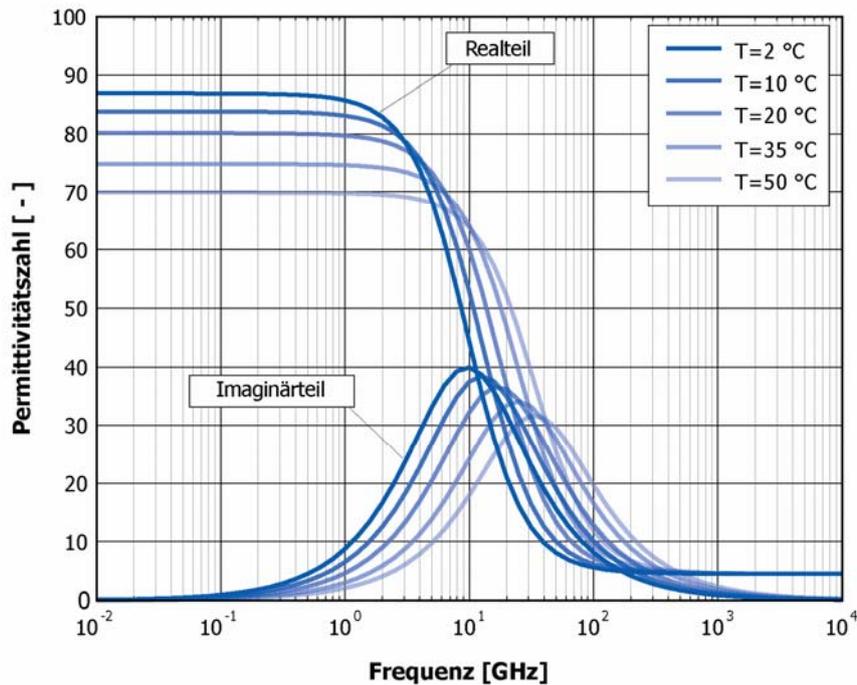


Bild 3.4: Permittivitätszahl von deionisiertem Wasser über der Frequenz mit variierender Temperatur $2^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$

Eine Darstellung des Zusammenhangs zwischen Imaginärteil und Realteil, mit der Frequenz als variabler Parameter, ist in Bild 3.5 bei unterschiedlichen Temperaturen wiedergegeben. Die gestrichelten Linien markieren die Frequenzkontourlinien. Diese Darstellung, bekannt als Cole-Cole Diagramm, nimmt die Form eines Halbkreises an mit den Endpunkten definiert bei $\epsilon = \epsilon_s$ bei der Niederfrequenz-Grenze und $\epsilon = \epsilon_{\infty}$ bei der Hochfrequenz-Grenze. Der Punkt auf dem Halbkreis, bei dem der Imaginärteil das Maximum erreicht, ist zugleich die Relaxationsfrequenz.

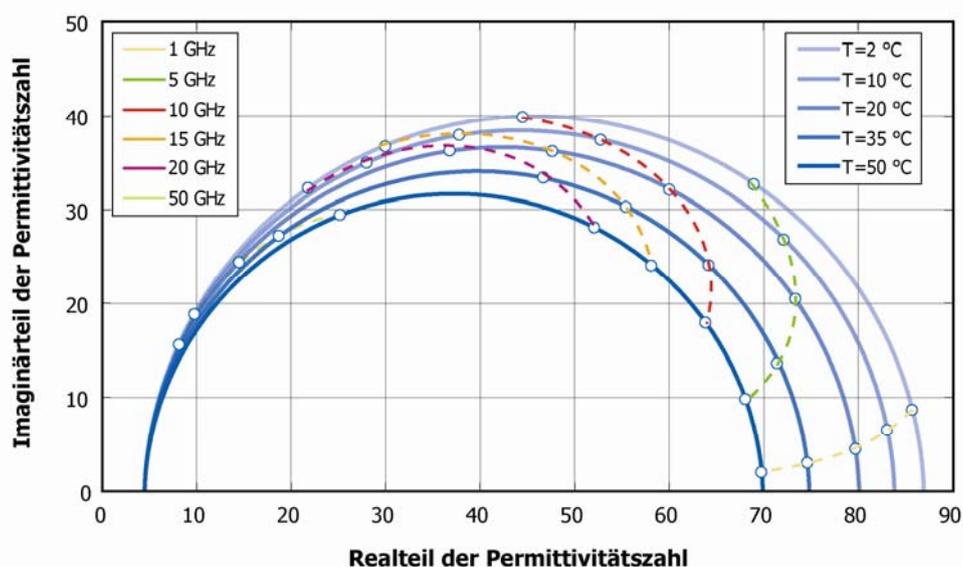


Bild 3.5: Cole-Cole Diagramm für die Permittivitätszahl von deionisiertem Wasser über der Frequenz mit variierender Temperatur $2^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$

3.4.1.2 Einfluss des Salzgehalts

Bei wässrigen Elektrolytlösungen werden die dielektrischen Eigenschaften durch die Leitfähigkeit der darin gelösten Ionen unterschiedlich beeinflusst. Messungen an Lösungen für Elektrolyte der Wertigkeitstypen (Wertigkeit z eines Moleküls: Zahl der Elementarladungen pro Ion, z.B. SO_4^- bedeutet $z=-2$; Wertigkeitstyp 1-1, z.B. gegeben bei NaCl) 1-1, 1-2, 2-1 und 3-1 zeigen nach Aussonderung des Leitfähigkeitsbeitrags einen weitgehend ähnlichen Verlauf wie für reines Wasser. Dies deutet daraufhin, dass die Elektrolyte der genannten Wertigkeitstypen kaum oder gar nicht eigene relaxierende Polarisationsanteile liefern, sondern lediglich die Orientierungspolarisation des Wassers verringern. Der dadurch entstehende Abfall der statischen Permittivitätszahl wird durch die in den Hydrathüllen der Ionen gefangen gehaltenen Wassermoleküle verursacht. Hingegen bestehen zwischen den Ionen 2-2-wertiger und höherwertiger Elektrolyte stärkere elektrostatische Wechselwirkungen, die eine eigene relaxierende dielektrische Polarisation dieser Elektrolyte und damit eine merkliche Abweichung der Permittivitätszahl ihrer Lösungen erwarten lässt. Bei Messungen von Pottel [78] an 2-2-wertigen Elektrolytlösungen wurden zwei deutlich unterscheidbare Relaxationsprozesse beobachtet. Der erste durchläuft sein Maximum sehr nahe bei der Relaxationsfrequenz des reinen Wassers. Die Relaxationsfrequenz des zweiten Polarisationsmechanismus, der sich der Dipolorientierung von Ionenpaaren zuordnen lässt, liegt deutlich tiefer.

In [72] sind die Cole-Cole Parameter für 1-1-wertige Elektrolytlösung mit NaCl als Elektrolyt als Funktion der Salzkonzentration angegeben:

$$\varepsilon_s(T,0) = 87,74 - 4,0008 \cdot 10^{-1} \cdot T + 0,09398 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 0,00141 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_\infty = 4,5 \quad (3.21)$$

$$\tau(T,0) = 17,68703 - 6,2240692 \cdot 10^{-1} \cdot T + 1,263 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 0,1354 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 0,005631 \cdot 10^{-4} \cdot T^4 \quad (3.22)$$

$$\alpha = 0,02 \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_s(T,N) = \varepsilon_s(T,0) \cdot a(N) \quad (3.24)$$

$$\tau(T,N) = \tau(T,0) \cdot b(N,T) \quad (3.25)$$

Wobei $a(N)$ und $b(N,T)$ Funktionen der Temperatur T und der Normalität N sind. Die Normalität beschreibt die Äquivalentmasse in Gramm der gelösten Substanz in 1 Liter Lösung, wobei die Äquivalentmasse die Atommasse dividiert durch die Wertigkeit ist:

$$a(N) = 1,00 - 0,2551 \cdot N + 5,151 \cdot 10^{-2} \cdot N^2 - 6,889 \cdot 10^{-3} \cdot N^3 \quad (3.26)$$

$$b(N,T) = 0,1463 \cdot 10^{-2} \cdot N \cdot T + 1,0 - 0,04896 \cdot N - 2,967 \cdot 10^{-2} \cdot N^2 + 5,644 \cdot 10^{-3} \cdot N^3 \quad (3.27)$$

Da der Salzgehalt in Wasser oft als Salinität S angegeben wird, ist es zweckmäßig eine Beziehung zwischen der Normalität N und der Salinität S zu haben. Die Salinität S einer Lösung ist definiert als die Masse des Salzes in Gramm gelöst in einem Kilogramm Lösung [72]:

$$N = S \cdot (1,707 \cdot 10^{-2} + 1,205 \cdot 10^{-5} \cdot S + 4,058 \cdot 10^{-9} \cdot S^2) \quad (3.28)$$

Bild 3.6 zeigt den Verlauf der Permittivitätszahl des salzhaltigen Wassers mit NaCl als Elektrolyt über die Frequenz mit variierender Salinität S (g/l) bei 20 °C.

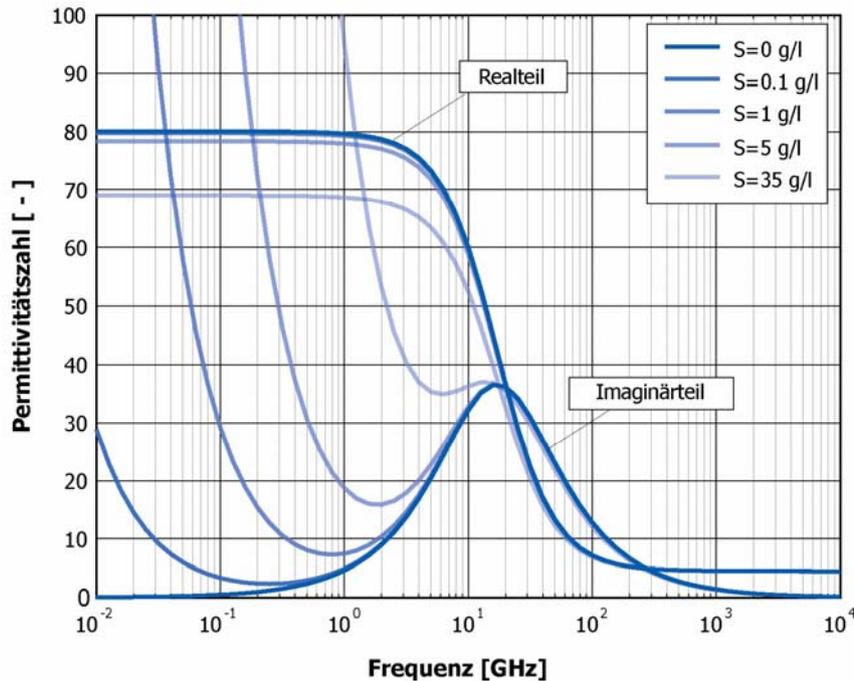


Bild 3.6: Permittivitätszahl von 1-1-wertiger Elektrolytlösung mit NaCl als Elektrolyt über der Frequenz bei variierender Salinität S (g/l) bei 20 °C [72]

Zusätzlich veranschaulicht Bild 3.7 den Verlauf der Permittivitätszahl eines salzhaltigen Wassers mit NaCl als Elektrolyt und einer Salinität von $S=1$ (g/l) über der Frequenz bei variierender Temperatur.

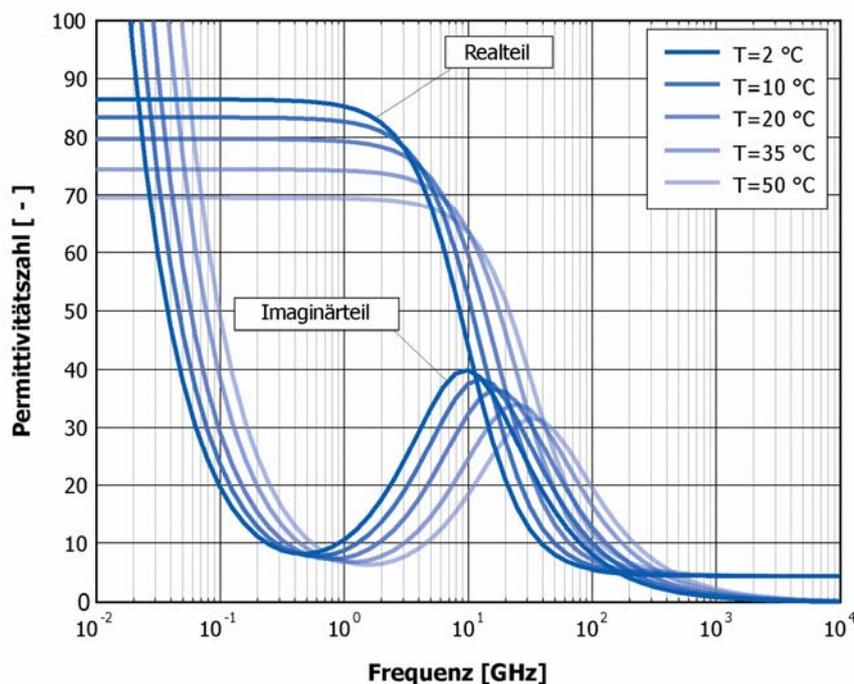


Bild 3.7: Permittivitätszahl einer 1-1-wertiger Elektrolytlösung mit NaCl als Elektrolyt und einer Salinität von $S=1$ (g/l) über der Frequenz bei variierender Temperatur

In den Poren des Betons befindet sich eine wässrige Elektrolytlösung, die den dielektrischen Eigenschaften des Betons durch die Leitfähigkeit der darin gelösten Ionen beeinflusst. Aus diesem Grund wurde der Einfluss des Salzgehalts in dieser Arbeit eine besondere Beachtung geschenkt.

3.4.2 Physikalisch gebundenes Wasser

An der Phasengrenzfläche einer Flüssigkeit oder eines Festkörpers sind die Moleküle nicht wie im Innern allseitig den gleichen Kraftfeldern ausgesetzt, sondern erfahren eine einseitig nach Innen gerichtete Kraft.

Durch die Wirkung dieser Oberflächenkräfte werden die dielektrischen Eigenschaften des Wassers umso mehr beeinflusst, je näher Wassermoleküle an der Oberfläche sind. Dabei dominiert die Bindungsenergie zwischen der Oberfläche und der Flüssigkeit und die Beweglichkeit der Wassermoleküle wird erheblich reduziert.

Dieser Vorgang ist eng mit der Ad- bzw. Desorption von Wasser aus der Gasphase durch die Oberfläche eines Festkörpers verknüpft. Poröse Stoffe streben einen Gleichgewichtszustand mit den thermischen und hygri-schen Verhältnissen der Umgebungsluft an, indem sich je nach Temperatur und Höhe der relativen Luftfeuchte Wassermoleküle an den inneren Porenwandoberflächen anlagern bzw. Wassermoleküle von der Oberfläche abgegeben werden. Der Zusammenhang zwischen der Menge des im porösen Feststoff angelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte wird bei isothermen Verhältnissen durch die Sorptionsisotherme charakterisiert.

Kennzeichnend ist der S-förmige Verlauf der Sorptionsisotherme. Bei geringen Feuchten lagern sich Wassermoleküle aufgrund von Van-der-Waalschen Kräften an die Oberfläche des Stoffes und werden dort sehr stark gebunden. Mit zunehmender relativer Feuchte nimmt zunächst die Belegung der Oberfläche zu, bis sich ein geschlossener Wasserfilm bildet, gefolgt von weiteren Wasserschichten. Die Bindungskraft nimmt dabei zunächst nur langsam ab. Bei hohen relativen Feuchten kann sich aufgrund der Sättigungsdampfdruckerniedrigung in engen Porenräumen Kapillarkondensation einstellen, und es kommt zu einer Befüllung der Kapillaren, in denen die Wassermoleküle weniger gebunden sind.

Bild 3.8 zeigt eine typische Sorptionsisotherme für einen porösen hygroskopischen Stoff. Im oberen Teil des Diagramms sind die ungefähren Bereiche für das Auftreten von Sorptionseffekten (Belegung der Porenwände mit mono- und multimolekularen Schichten, Kapillarkondensation) sowie die Radien der dabei bereits gefüllten Poren angegeben. Neben den Bereichen für sorptiv gebundenes und ungebundenes Wasser im Porenraum sind noch schematisch die Stofffeuchten für völlige Wassersättigung u_{\max} (meist nur durch äußere Drücke erreichbar) und „freie“ Wassersättigung u_f (z.B. bei Wasserlagerung) angegeben.

Kämpf und Kohlschütter [53], von Ebert und Langhammer [34], Baldwin und Morrow [6], McCafferty et al. [64] haben die dielektrischen Eigenschaften sorbierten Wassers an unterschiedlichen Systemen in einem breiten Frequenzbereich untersucht. Sie beobachteten, dass eine monomolekulare Schicht von adsorbiertem Wasser keine Änderung der Permittivitätszahl hervorruft. Die Wassermoleküle in der ersten monomolekularen Schicht sind besonders fest gebunden und können sich im elektrischen Feld nicht orientieren. Sie tragen somit, wenn man von der für Wassermoleküle geringfügigen Elektronen- und Atompolarisation absieht, nichts zur Permittivitätszahl des Sorbats bei.

Die Wassermoleküle der zweiten Schicht sind mehr beweglich. Die Dipolorientierung kann zur Gesamtpolarisation beitragen. Dabei liegen die gemessenen charakteristischen Relaxationsfrequenzen abhängig von der Temperatur zwischen 100 Hz und 100 kHz. Mit zunehmender Wasserbeladung bis hin zu mehreren Wasserschichten tritt zunächst eine Verschiebung

der charakteristischen Relaxationsfrequenz zu höheren Frequenzen auf, wobei sich die Zunahme der Relaxationsfrequenz bei einer weiteren Erhöhung der Wasserbeladung einstellt. Jenseits von etwa sieben Schichten dominiert freies Wasser [73].

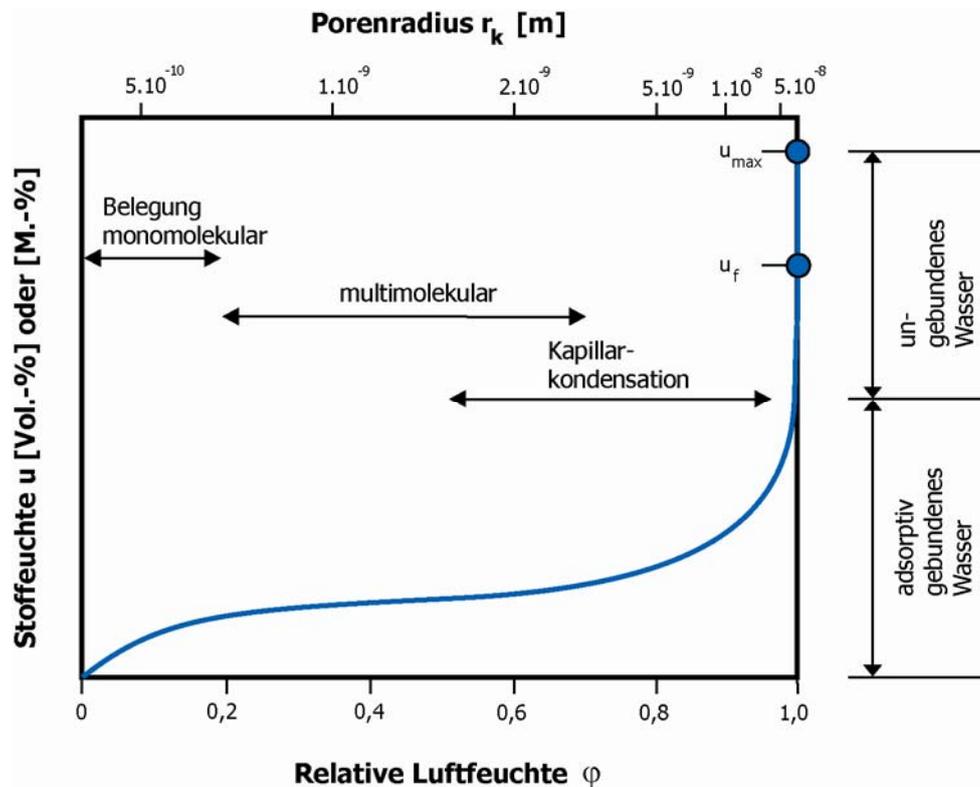


Bild 3.8: Schematische Darstellung einer Sorptionsisotherme für hygroskopische poröse Baustoffe nach Kießl [54]

McIntosh [65] stellt fest, dass sich das Verhalten der Dipole in einer adsorbierten Schicht im Bereich höherer Wassergehalte, d. h. bei hoher Schichtdicke, befriedigend mit Hilfe der Debye-Theorie [18] beschreiben lässt.

Zusammenfassend kann das physikalisch gebundene Wasser als besonders fest gebundene Wassermoleküle, die sich im elektrischen Feld nicht orientieren können, definiert werden. Der dielektrische Einflussbereich der Oberflächenbindungsenergie beträgt etwa 7 Wasserschichten [73]. Darüber hinaus befindet sich freies Wasser.

Aufgrund der großen spezifischen Oberfläche des Zementes von bis zu 780 m²/g (vgl. Abschnitt 4.2.3) wurde der Einfluss des physikalisch gebundenen Wassers auf die dielektrischen Eigenschaften des Betons in dieser Arbeit ausführlich untersucht.

3.4.3 Chemisch gebundenes Wasser

Bei chemisch gebundenem Wasser sind die Wassermoleküle sehr eng mit der molekularen Struktur des Feststoffes chemisch verbunden und werden als Kristallwasser bezeichnet. Das fest gebundene Wasser lässt sich nur durch chemische Reaktion oder Glühen aus dem Feststoff entfernen und führt meistens zur Zerstörung der Molekülstruktur.

Das chemisch gebundene Wasser eines trockenen anorganischen Kristalls erfährt in der Regel einen Relaxationsprozess in der Kilohertz-Region [46]. Dies deutet darauf hin, dass das chemisch gebundene Wasser ein ähnliches dielektrisches Verhalten aufweist wie Eis, welches eine Relaxationsfrequenz von etwa 10 kHz besitzt ([37], [38], [81]).

3.5 Dielektrische Eigenschaften von Feststoffen

Mineralische Feststoffe weisen in der Regel nahezu temperatur- und frequenzunabhängige dielektrische Eigenschaften auf. Je nach chemischer Zusammensetzung kann die Permittivitätszahl bei vernachlässigbarem Verlustanteil (Imaginärteil) zwischen 2 und 10 betragen [50]. Die Permittivitätszahl für unterschiedliche Substanzen sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Permittivitätszahl für unterschiedliche Substanzen bei einer Messfrequenz bis ca. 1 GHz nach Poley [77]

Substanz	Realteil der Permittivitätszahl ϵ'
Quarz	4,5-4,7
Kalzit	7-8
Schiefer	13-15
Luft	1
Öl	2,2
Wasser	80

3.6 Dielektrische Eigenschaften von Luft

Die Permittivitätszahl der trockenen, CO₂-freien Luft $\epsilon_{t,p}$ kann in Abhängigkeit der Temperatur T und des Druckes p für den gesamten Frequenzbereich durch folgende Gleichung angegeben werden [95]:

$$\epsilon_{t,p} = \left(\epsilon_{20^\circ, 1 \text{ atm}} - 1 \right) \cdot \frac{p}{760 \cdot [1 + 0,003411 \cdot (T - 20)]} + 1 \quad (3.29)$$

mit:

$$\epsilon_{20^\circ, 1 \text{ atm}} = 1,0005366 \quad (3.30)$$

wobei p der Druck in [mmHg] und T die Temperatur in [°C] ist.

3.7 Dielektrische Eigenschaften heterogener Substanzen

In der praktischen Anwendung ist es wünschenswert, eine mikroskopisch komplizierte Mischung als makroskopisch homogen zu betrachten. Im Allgemeinen bestehen heterogene Mischungen aus einzelnen Komponenten mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften. Einer dieser Komponenten ist häufig Wasser. Die Permittivitätszahl des Wassers, die in der Regel deutlich höher als die der anderen Komponenten ist, ermöglicht das messtechnische Erfassen von Wasser im Verband anderer Stoffe, auch bei geringen Feuchtegehalten.

Mehrere theoretische und empirische Mischungsregeln wurden vorgeschlagen, um die effektive Permittivität einer heterogenen Mischung in Beziehung zu den bekannten dielektrischen Eigenschaften sowie den Volumenanteilen der einzelnen Komponenten zu setzen [87].

Bild 3.9 zeigt ein einfaches Modell einer multiphasigen Mischung. Einer der Materialkomponenten stellt eine Art Gastmatrix (die „Umwelt“ ε_e) dar. Die anderen Materialkomponenten ε_1 , ε_2 und ε_3 sind in dieser Matrix als Einschlüßungen eingebettet.

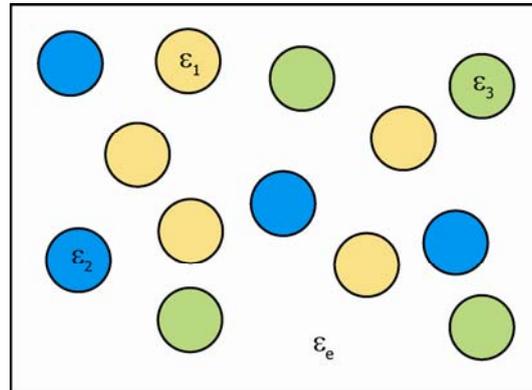


Bild 3.9: Einfaches Modell einer multiphasigen Mischung mit Gastmatrix ε_e und eingebetteten Einschlüßungen ε_1 , ε_2 und ε_3 nach Sihvola [87]

Im Gegensatz zu den empirischen Mischungsregeln wird bei den theoretisch hergeleiteten Mischungsregeln der Depolarisationsfaktor, der die Geometrie der Einschlüßungen beschreibt, berücksichtigt. Die theoretischen Mischungsregeln sind für ellipsoidförmige Einschlüßungen, die im Gastmedium eingebettet sind, hergeleitet. Dabei wird angenommen, dass der Durchmesser der eingeschlossenen Partikel viel kleiner ist als die Wellenlänge des angelegten Feldes. Die Polarisations-eigenschaften für gleichförmige Ellipsoide, d. h. Ellipsoide mit gleichem Axialquotient, sind durch drei Depolarisationsfaktoren N_1 , N_2 und N_3 entlang der drei Ellipsoidachsen bestimmt. Diese können durch die Halbachsen a_1 , a_2 und a_3 nach Landau und Lifshitz [57] berechnet werden:

$$N_i = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(a_i^2 + s) \cdot [(a_1^2 + s) \cdot (a_2^2 + s) \cdot (a_3^2 + s)]^{1/2}} \quad (3.31)$$

Die Summe der Depolarisationsfaktoren entlang der drei Ellipsoidachsen beträgt Eins:

$$N_1 + N_2 + N_3 = 1 \quad (3.32)$$

Für einige besondere Formen eines Ellipsoids kann das oben genannte Integral mathematisch vereinfacht werden. Für eine Kugel betragen die Depolarisationsfaktoren (1/3, 1/3, 1/3). Bei den zwei Extremformen, eine Nadel und eine Scheibe, ergibt sich für die Nadel (1/2, 1/2, 0) und für die Scheibe (0, 0, 1). Die Depolarisationsfaktoren sind nur von dem Quotient der Halbachsen und nicht von ihrem absoluten Wert abhängig. Infolgedessen können die Einschlüßungen unterschiedliche Größen haben.

Eine der bekanntesten Mischungsregeln ist die von Polder-van Santen ([76], [88]). Sie wurde mit Erfolg zur Erklärung und Vorhersage des dielektrischen Verhaltens verschiedenartiger Medien, wie z. B. Böden und Schnee, eingesetzt ([32], [44]). Sie ist für multiphasige, isotrope und anisotrope Mischungen allgemein gültig. Die Einschlüßungen der verschiedenen Phasen können unterschiedliche Größen, beliebige Achsenverhältnisse und Achsenorientierung haben. Die Gültigkeit der Mischungsregel von Polder-van Santen (siehe Gleichung (3.33)) ist für eine maximale Achsenlänge der elliptischen Einschlüßungen von $d_{\max} \approx \lambda / 2 \cdot \pi$ beschränkt [88], mit λ als Wellenlänge des angelegten Feldes:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_b + \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{3} \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_b) \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_m + N_j \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_m)} \quad (3.33)$$

mit:

ε_m Permittivitätszahl des untersuchten Gemisches

ε_b Permittivitätszahl der Feststoffphase

ε_i Permittivitätszahl der Einschlüßungen (z.B. freies Wasser, physikalisch gebundenes Wasser und Luft)

V_i Volumenanteile der einzelnen Einschlüßungen

N_j Depolarisationsfaktor eines Ellipsoids entlang der drei Ellipsoidachsen, mit $j = 1 \dots 3$

n Anzahl der Einschlüßungen; $n=2$ (freies Wasser und Luft) bei dreikomponentigen Gemischen und $n=3$ (freies Wasser, physikalisch gebundenes Wasser und Luft) bei vierkomponentigen Gemischen

3.8 Einfluss von Materialinhomogenitäten

Bei Messungen im Mikrowellenbereich, wo Korndurchmesser oder Materialinhomogenitäten, wie z. B. Hohlräume, bereits die Größenordnung der Wellenlänge erreichen, kann es zu Signalstörungen und Messungenauigkeiten durch unerwünschte Reflexionen kommen [41]. Die Materialinhomogenitäten wirken als Streuzentren und beeinflussen die Adsorption, Reflexion sowie die Streueigenschaften des Feldes. Die Streueffekte bewirken zusätzlich zur dielektrischen Dämpfung eine Streudämpfung. Diese steigen mit der Größe und Anzahl der Inhomogenitäten sowie bei Erhöhung der Frequenz stark an [41].

Um die unerwünschten Streueffekte auszuschalten, empfiehlt es sich, die Wellenlänge der Arbeitsfrequenz auf Werte $\lambda_e > 2 \cdot a$, mit a = Durchmesser der Körner zu wählen. Dabei ist λ_e die durch das Medium verkürzte Wellenlänge der Arbeitsfrequenz. Sie beträgt für verlustbehaftete Medien [41]:

$$\lambda_e = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r' \cdot \operatorname{Re} \left[\sqrt{1 + j \cdot \tan \delta} \right]}} \quad (3.34)$$

Dabei ist λ_0 die Wellenlänge des angelegten Feldes, ε_r die Permittivitätszahl des Mediums und $\tan \delta$ der Verlustfaktor:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (3.35)$$

Daraus ergibt sich die Bedingung für die Wahl der höchst zulässigen Messfrequenz. Für eine Frequenz von 9,3 GHz beispielsweise ergibt sich für Betonzuschlagkörner mit einer Permittivitätszahl von $\varepsilon_r = 4 - j \cdot 0$ ein Durchmesser von $a < 8$ mm. Bei 2,5 GHz kann der Anwendungsbereich bis zu Korngrößen $a < 30$ mm erweitert werden [56].

3.9 Einfluss der geometrischen Form der Einschliefungen

Im Allgemeinen ist die Permittivitätszahl einer heterogenen Mischung eine Funktion der Frequenz, der Temperatur, des volumetrischen Gehalts der Einschliefungen, der Porosität, der Partikelart und der Einschliefungsform [45].

Colbeck [17] hat die Geometrie der Wassereinschliefungen bei Schnee sowie deren Einfluss auf die Permittivitätszahl untersucht. Er folgerte, dass Schnee, wie jedes poröse Material zwei deutlich unterschiedliche Zustände der Wassersättigung aufweist. Bei geringen Feuchtegehalten (*pendular regime*) bildet Luft ein kontinuierliches System, während Wasser als isolierte Einschliefungen vorkommt. Bei hohen Feuchtegehalten (*funicular regime*) bildet Wasser ein zusammenhängendes System, wobei Luft als eingeschlossene Blasen zwischen Verengungen im Porensystem vorliegt. Dabei besteht zwischen diesen beiden Zuständen ein scharfer Übergang [45]. Hydrologische Modelle zeigen, dass die Form von Flüssigwassereinschliefungen sich als Funktion des Wassergehalts ändert [45]. Laut Colbeck [17] sind Flüssigwassereinschliefungen in Schnee bei geringen Feuchtegehalten annähernd nadelförmig und werden bei hohen Feuchtegehalten annähernd scheibenförmig.

Die dielektrischen Eigenschaften von feuchtem Schnee wurden von Hallikainen et al. [45] im Frequenzbereich von 3 bis 37 GHz untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die theoretische Mischungsregel von Polder-van Santen [76] (vgl. Gleichung (3.33)) eine optimale Anpassung im gesamten Frequenzbereich zu den gemessenen Werten des Real- und Imaginärteils der Permittivitätszahl erzielt, wenn die geometrische Form der Wassereinschliefungen in Schnee sowohl unsymmetrisch als auch Abhängig vom Wassergehalt vorausgesetzt wird. Die erzielten Ergebnisse (siehe Bild 3.10), die mittels Optimierung der geometrischen Form der Wassereinschliefungen durch Anpassung der gemessenen Werte an die Mischungsregel von Polder-van Santen gewonnen wurden, stehen in guter Übereinstimmung zu der physikalischen und hydrodynamischen Struktur von feuchtem Schnee.

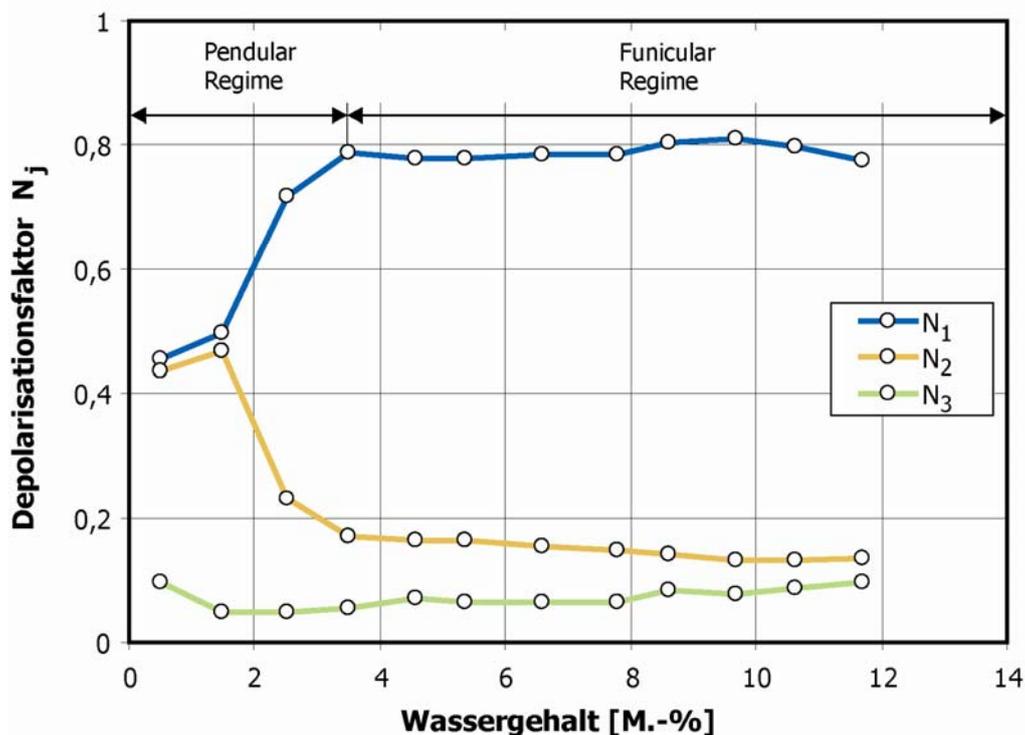


Bild 3.10: Depolarisationsfaktoren N_1 , N_2 und N_3 für Wassereinschliefungen in Schnee, optimiert durch Anpassung der gemessenen Permittivitätszahlen an die Mischungsregel von Polder-van Santen [45]

Sen [84] und Mendelson [66] haben dielektrische Untersuchungen an Felsgesteinen durchgeführt und festgestellt, dass ein hohes Achsenverhältnis der Gesteinskörner zu einer wesentlichen Erhöhung der Permittivitätszahl des Gesteins führen kann.

Daraus folgt, dass die geometrische Form der Einschlüßungen einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Messsignal hat und somit unbedingt in jeder dielektrischen Messung an heterogenen Substanzen zu berücksichtigen ist. Dies gilt auch insbesondere für Beton, der aufgrund abwechselnder Trocknung und Befeuchtung unterschiedliche Wassergehalte aufweisen kann. Somit können unterschiedliche geometrische Formen der Einschlüßungen in ein und demselben Beton entstehen.

4 Eigenschaften des Baustoffs Beton

Der auf der Welt am häufigsten verwendete Baustoff Beton besteht aus der Matrix Zementstein und den Zuschlagstoffen Kies und Sand. Das Bindemittel, das die wesentlichen Eigenschaften des Betons bestimmt, ist der Zement.

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel und besteht aus einem gemahlenden, nichtmetallischen, anorganischen Stoff. Mit Wasser vermischt ergibt er Zementleim. Dieser erstarrt und erhärtet durch Hydratationsreaktionen zu Zementstein. Hauptbestandteile von handelsüblichem Zement sind nach DIN 1164 [25] Portlandzementklinker, Hüttensand, natürliches Puzolan, kieselsäurereiche Flugasche, gebrannter Schiefer, Kalkstein und Füller. Man unterscheidet zwischen drei Hauptarten von Zementen: CEM I Portlandzement, CEM II Portlandkompositzement und CEM III Hochofenzement. Sie unterscheiden sich sowohl in ihrer Zusammensetzung als auch in ihren bautechnischen Eigenschaften. Dazu zählen insbesondere ihr Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten, die erreichbare Festigkeit, die Hydratationswärmeentwicklung, die Raumbeständigkeit, die spezifische Oberfläche und der Wasseranspruch, Schwind- und Quelleigenschaften sowie der erreichbare Widerstand gegen Frost, Alkalireaktion und chemischen Angriff.

4.1.2 Betonzuschlag

Unter Betonzuschlag versteht man ein Gemenge von gebrochenen oder ungebrochenen, gleich oder verschieden großen Körnern aus natürlichen mineralischen Stoffen. Die Betonzuschläge werden unterschieden nach Stoffart und Korngruppe. Die Kornzusammensetzung des Betonzuschlags bestimmt den Wasseranspruch einer Betonmischung, der zur Erzielung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit des Frischbetons erforderlich ist. Die Korngrößenverteilung eines Zuschlaggemisches wird durch eine so genannte Sieblinie charakterisiert. Die DIN 1045 [22] schlägt Regelsieblinien für Zuschlaggemische mit unterschiedlichem Größtkorn vor. Dabei wird jeweils zwischen den Grenzsieblinien A, B, C und U sowie zwischen den Sieblinienbereichen 1 bis 5 unterschieden (vgl. Bild 4.1).

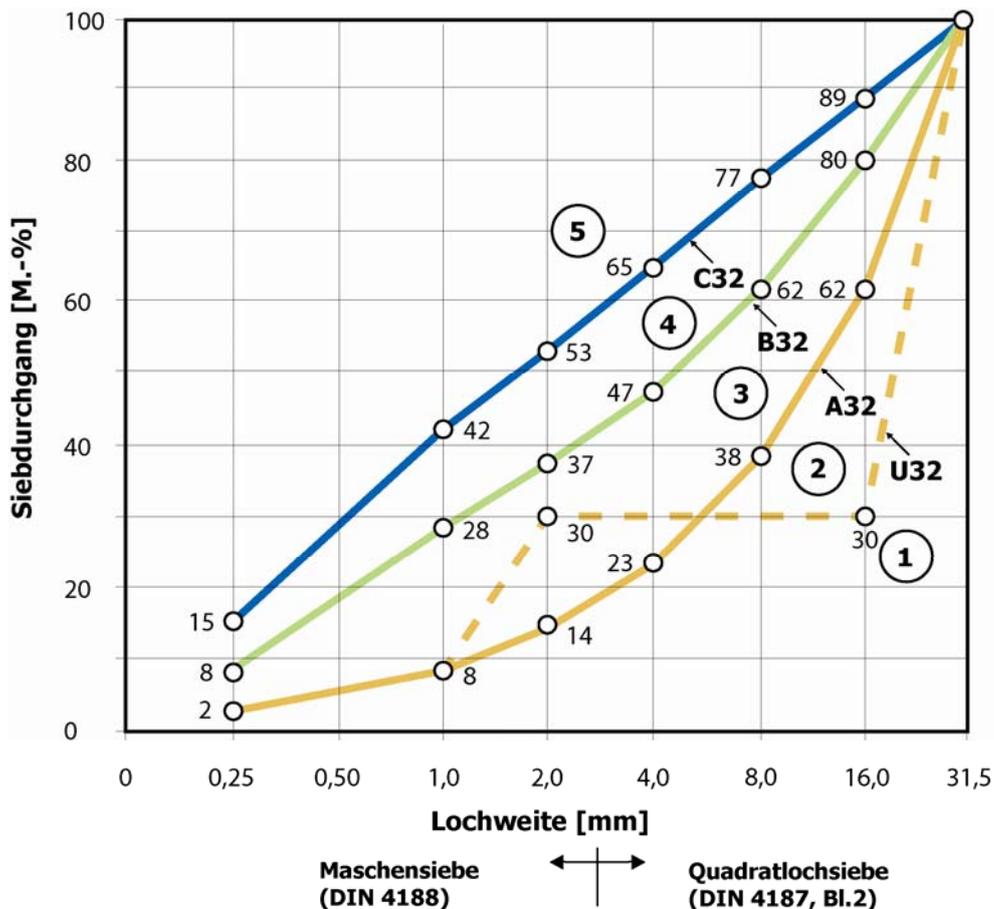


Bild 4.1: Grenzsieblinien für Zuschlaggemische mit einem Größtkorn von 32 mm nach DIN 1045 [22]

4.2 Mikrostruktur von Zementstein und Beton

Bei der Reaktion des Zements mit dem Anmachwasser entstehen wasserhaltige Verbindungen, die so genannten Hydratphasen. Die wichtigste Hydratphase, die bei der Hydratation fast aller Zemente entsteht und für die Festigkeit verantwortlich ist, ist das Kalziumsilikathydrat. Diese Kristalle sind schichtförmig aufgebaut und können zwischen den einzelnen Lagen Wassermoleküle einbauen. Neben dem Kalziumsilikathydrat entstehen beträchtliche Mengen Kalziumhydroxid und etwas Kalziumkarbonat.

Durch das Mischen von Zement mit Wasser beginnt ein Hydratationsprozess, der an der Oberfläche der Zementpartikel seinen Ausgang hat. Die Bildung von Hydratationsprodukten führt zu einem Zusammenwachsen der einzelnen Zementkörner. Dadurch entsteht ein durchgehendes Skelett. Das Volumen der Kapillarporen und somit die Gesamtporosität (siehe Kap. 4.2.1) nimmt mit zunehmender Hydratation ab, und das Zementsteinsystem entwickelt Festigkeit. Dabei sind die Hydratationsprodukte um etwa drei Größenordnungen kleiner als die unhydratisierten Zementkörner und weisen eine kolloidale Größe auf. Die Struktur eines erhärteten Zementsteins entspricht daher einem starren Gel.

4.2.1 Porenstruktur und Porengrößenverteilung

Die bei der Hydratation des Zements entstehenden Strukturen sind für die mechanischen Eigenschaften, die Dauerhaftigkeit und die Dichtheit des Betons von wesentlicher Bedeutung.

Powers et al. [80] unterscheiden bei Beton zwischen Luftporen, die einige Zehntel Millimeter groß sind, Kapillarporen die etwa bei einem Mikrometer liegen und Gelporen, die Porenradien in der Größenordnung von einigen Nanometern haben, wobei die Luftporen der im Frischbeton nach dem Verdichten verbleibende Luftgehalt sind und die Kapillarporen die Reste des Volumens, das ursprünglich vom Mischwasser eingenommen wurde. Die Gelporen trennen die einzelnen Gelpartikel voneinander; sie haben Durchmesser im Bereich von ca. 10^{-5} bis 10^{-7} mm und bieten demnach Platz für höchstens 5 Moleküle Wasser. Sind diese Poren gefüllt, so bezeichnet man das darin enthaltene Wasser als Gelwasser [70].

Berücksichtigt man, dass der Radius der Gelpore nur um etwa einen Faktor 10 größer ist als der Durchmesser eines einzelnen Wassermoleküls, so ist zu erkennen, dass sich das gesamte Wasser im Gelporenraum im Einflussbereich der Oberfläche befindet.

Setzer [86] gibt für die einzelnen Porenradien folgende obere Grenzen an: Mikroporen bis 2 nm, Mesoporen bis 50 nm, Mikrokapillaren bis 2 μm , (Meso-) Kapillaren bis 50 μm und Makrokapillaren bis 2 mm (siehe Bild 4.2). Der hydraulische Radius R_H in Bild 4.2 ist mit der Durchlässigkeit bzw. dem Strömungswiderstand im Porensystem verbunden und entspricht der Querschnittsfläche geteilt durch den benetzten Umfang.

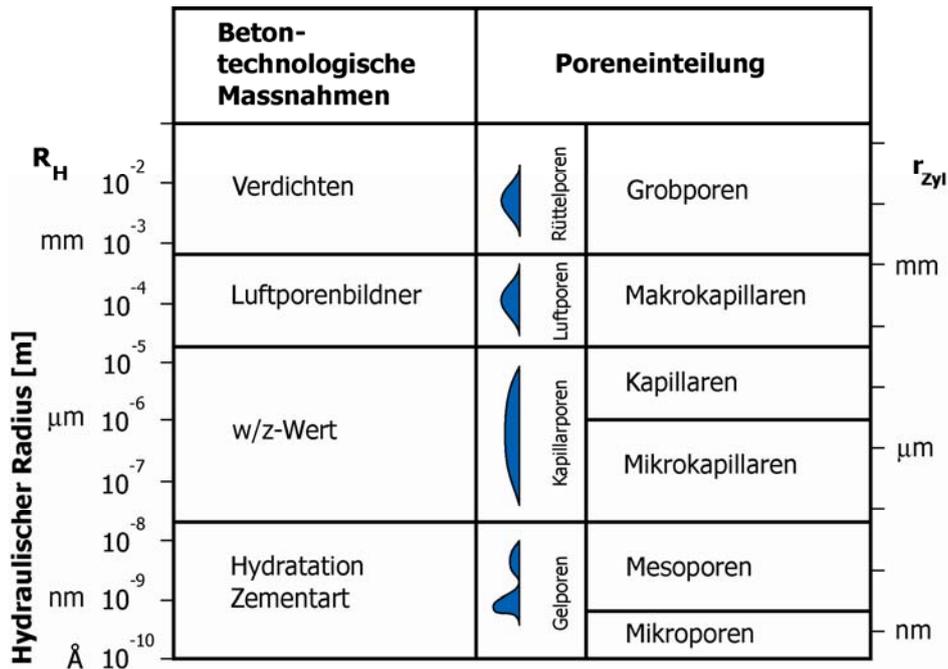


Bild 4.2: Einteilung der Poren im Beton nach Setzer [86]

4.2.2 Modifikationen des Wassers in Zementstein

Bei Wassersättigung enthält Zementstein drei Arten von Wasser: nicht verdampfbares, chemisch gebundenes Wasser, Gel- und Adsorptionswasser und Kapillarwasser. In Beton mit Verdichtungsporen ist zudem noch freies Wasser in den Hohlräumen zu finden, die größer als die Kapillarporen sind.

Die Wechselwirkung des adsorbierten Wassers mit den Hydratationsprodukten beeinflusst in starkem Maße die mechanischen Eigenschaften des Zementsteins bzw. des Betons. Die Fes-

tigkeit, die elastische sowie die nichtelastische Verformung hängen auch wesentlich vom Wassergehalt des Zementsteins ab.

Als nicht verdampfbares Wasser wird jenes Wasser bezeichnet, das nach Trocknung des Zementsteins bei 105 °C noch im Zementstein enthalten ist und erst bei höheren Temperaturen bis 1000 °C entweicht. Gelwasser ist adsorptiv gebunden und hat im Vergleich zu freiem Wasser eine geringere Beweglichkeit. Das Kapillarwasser verhält sich im Wesentlichen wie freies Wasser.

Englert et al. ([35], [36]) geben an, dass Wasser bei Wiederbefeuchtung von ausgetrocknetem Zementstein nicht nur als Porenwasser vorliegt, sondern teilweise auch als Hydratwasser in die Hydratationsprodukte des Zementsteins eingelagert wird. Diese Modifikationen sind instabil gegenüber Feuchteänderungen. Darauf aufbauend teilt Wittmann [101] das Wasser im Zementstein neben dem Kapillarwasser in drei Gruppen ein: chemisch gebundenes und gegenüber Feuchteänderungen invariantes Hydratwasser, Hydratphasen, die beim Austrocknen abgebaut werden und beim Wiederbefeuchten im Bereich hoher Luftfeuchten zumindest teilweise entstehen und adsorbiertes Wasser, das im gesamten Feuchtebereich kontinuierlich aufgenommen bzw. abgegeben wird.

4.2.3 Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche wird definiert als die Oberfläche im Verhältnis zur spezifischen Stoffmenge. Je feiner ein Adsorbens verteilt ist, umso höher ist auch ihr Adsorptionsvermögen. Bei feiner Verteilung kann die spezifische Oberfläche sehr hohe Werte erreichen.

Die Frage nach der spezifischen Oberfläche von Zementstein war mehrfach Gegenstand von Diskussionen und unterschiedlichen Anschauungen.

Die am weitesten verbreitete Methode zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche ist die Adsorptionsmessung. Brunauer, Emmet und Teller [14] haben 1938 gezeigt, dass sich aus dem Verlauf der Adsorptionsisotherme bei niederen Feuchten die innere Oberfläche hochporöser Materialien bestimmen lässt (BET-Theorie).

So wurden mit Stickstoff als Adsorbat Zementsteinoberflächen zwischen 10 m²/g und 90 m²/g gemessen [59]. Die mit Wasserdampf als Adsorbat ermittelten Oberflächen lagen mit 100 m²/g bis zu 200 m²/g eine Größenordnung höher ([5], [43]). Wilson [99] hat mit Hilfe der Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS) Werte bis zu 780 m²/g gemessen. Geringere Werte von 100 m²/g bis zu 400 m²/g wurden von Bier und Hilsdorf [10] und Völkl et al. [93] ermittelt.

Sereda [85] und Sabri [82] führen für Zementstein neben dem physikalisch sorbierten Wasser auch den Einbau von Strukturwasser an. Unter Berücksichtigung dieser Hypothese verringert sich die mit dem Adsorbat H₂O bestimmte innere Oberfläche auf den mit dem Adsorbat N₂ bestimmten Wert.

Die spezifische Oberfläche von Beton fällt entsprechend dem Verhältnis des massenbezogenen Anteils von Zementstein zum Gesamtgewicht von Beton geringer aus. Dabei übt die spezifische Oberfläche des Betonzuschlags einen vernachlässigbaren Einfluss aus.

4.3 Eigenschaften des Porenwassers

4.3.1 Relaxationszeit des Porenwassers in Zementstein

Die Relaxationszeit ist charakteristisch für die Beweglichkeit der Dipole. Die hohe Beweglichkeit der Wassermoleküle im freien Wasser ist an der extrem kleinen Relaxationszeit zu erkennen. Die adsorbierten Wassermoleküle hingegen werden durch Oberflächenkräfte gebunden. Entsprechend wird ihre Beweglichkeit reduziert, und die Relaxationszeit wird größer.

Zech [103] hat umfangreiche Analysen zum dielektrischen Verhalten des Zementsteins im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz durchgeführt. Dabei hat er unter anderem den Einfluss der Temperatur und des Wassergehalts auf die Relaxationszeit untersucht. Der Messsensor bestand aus einem vergoldeten Plattenkondensator. Die Zementsteinproben wurden aus einem CEM I-Zement mit einem Wassergehalt von $w/z = 0,5$ hergestellt und im Alter von 7 Tagen untersucht. Dabei betrug die mittlere Rohdichte des Zements $\rho = 2,82 \text{ g/cm}^3$. Die Proben zur Messung der Permittivitätszahl bei unterschiedlichen Temperaturen hatten ein Format von $35 \times 32 \times 1 \text{ mm}$. Die Abmessung der Proben zur Untersuchung des Wassergehaltseinflusses betrug $30 \times 20 \times 0,4 \text{ mm}$.

4.3.1.1 Einfluss der Temperatur auf die Relaxationszeit

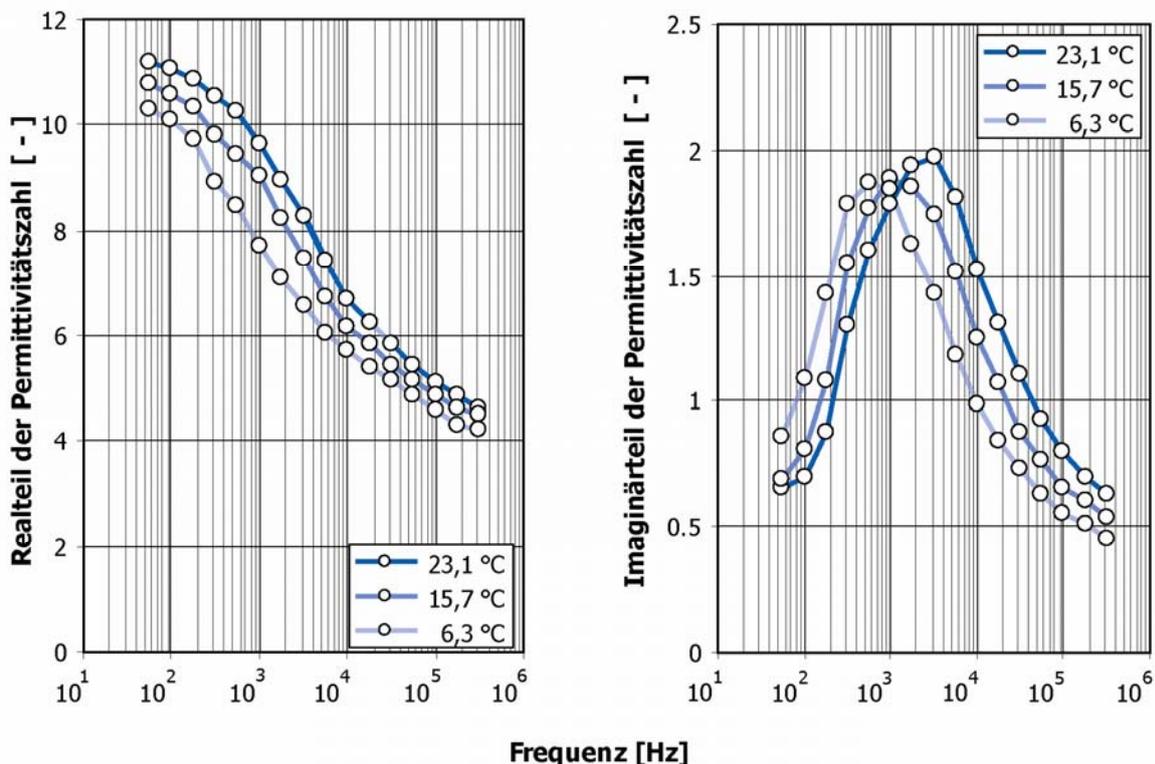


Bild 4.3: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl von Zementstein als Funktion der Frequenz bei verschiedenen Temperaturen. Der Wassergehalt betrug 9,6 Vol.-% (CEM I 32,5 R, $w/z = 0,5$, Alter = 7 Tage, $\rho = 2,82 \text{ g/cm}^3$, $T = 20 \text{ °C}$) (nach Zech [103])

Der von Zech [103] ermittelte Verlauf der komplexen Permittivitätszahl von Zementstein in Abhängigkeit von der Frequenz ist in Bild 4.3 dargestellt. Der Wassergehalt des Zementsteins

betrug 9,6 Vol.-%. Deutlich zu erkennen ist eine Verschiebung der Verlustmaxima zu kleineren Frequenzen mit abnehmender Temperatur (Bild 4.3 rechts). Der Realteil der Permittivitätszahl nimmt ab, und der Imaginärteil durchläuft ein ausgeprägtes Maximum. Die Maxima sind gegenüber der Debye-Theorie, die die Abhängigkeit von der Permittivität von der Frequenz bei sehr vielen polaren Materialien nach Gleichung (3.19) beschreibt, etwas verbreitert. Zech führt diese Verbreiterung auf eine Verschmierung der Relaxationszeiten um eine mittlere Relaxationszeit zurück. Die von Debye für Festkörper und Flüssigkeiten entwickelte Dipoltheorie lässt sich im Wesentlichen auch auf die Behandlung der dielektrischen Eigenschaften adsorbierter Filme übertragen [102].

4.3.1.2 Einfluss des Wassergehalts auf die Relaxationszeit

In Bild 4.4 sind die nach Zech [103] ermittelten Relaxationszeiten des adsorbierten Wassers in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Zementsteins mit der dazu gehörigen Adsorptionsisotherme dargestellt. Die Relaxationszeiten nehmen mit wachsendem Wassergehalt entlang einer gekrümmten Kurve zu. Dieser charakteristische Zusammenhang wird auch von Mc Cafferty et al. [64] am System Eisenoxid-Wasser beobachtet. Die großen Relaxationszeiten der adsorbierten Schicht bei niedrigem Wassergehalt weisen auf eine starke Bindung zur Oberfläche hin. Mit zunehmendem Wassergehalt werden die Relaxationszeiten kleiner und das adsorbierte Wasser beweglicher. Zwischen einer relativen Umgebungsfeuchte von etwa 60 % und 90 % werden die Gelporen gefüllt (siehe Bild 4.5). Die Relaxationszeiten flachen ab und ändern sich ab 90 % r. F. nur noch geringfügig. Dies deckt sich mit Messungen von Dransfeld, Frisch und Wood [33], die feststellten, dass sich die Relaxationszeit des kapillar-kondensierten Wassers in porösem Aluminiumoxid bei hohen Feuchten nicht mehr ändert.

Ab etwa 90 % r. F. sammelt sich auch Wasser in den größeren Kapillaren und Poren. Die Relaxationszeit dieses Wassers konnte von Zech nicht bestimmt werden, da sie außerhalb seines Messbereiches lag.

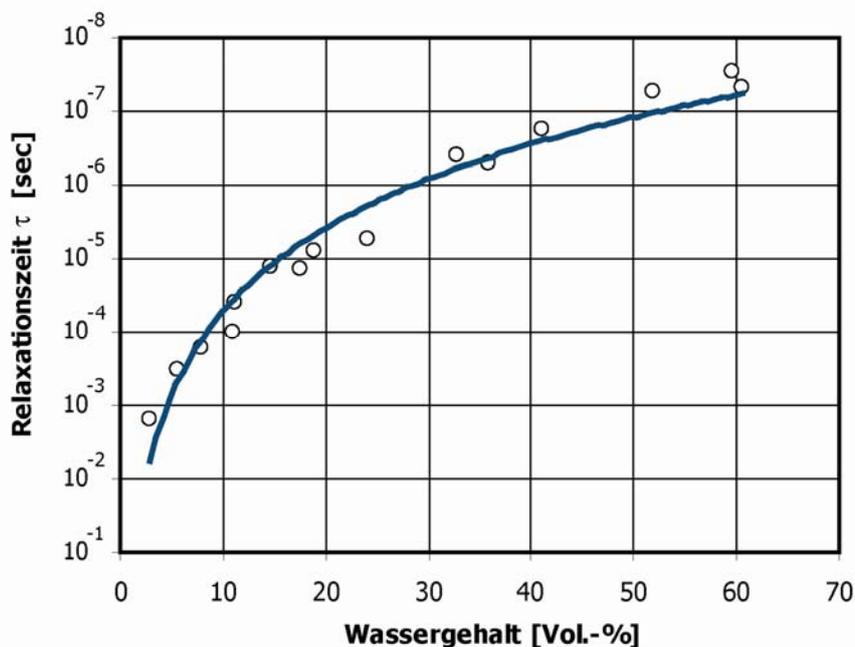


Bild 4.4: Relaxationszeit von Zementstein in Abhängigkeit des volumenbezogenen Wassergehalts (CEM I 32,5 R, w/z = 0,5, Alter = 7 Tage, $\rho = 2,82 \text{ g/cm}^3$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) [103]

Wie in Bild 4.4 ersichtlich ist, liegen die Relaxationszeiten bei hohem Wassergehalt bei 10^{-7} bis 10^{-8} sec. Freies Wasser hat eine Relaxationszeit von etwa 10^{-11} sec (siehe Bild 3.6). Dies zeigt, dass die Beweglichkeit des Gelporenwassers um einen Faktor 10^3 bis 10^4 reduziert ist.

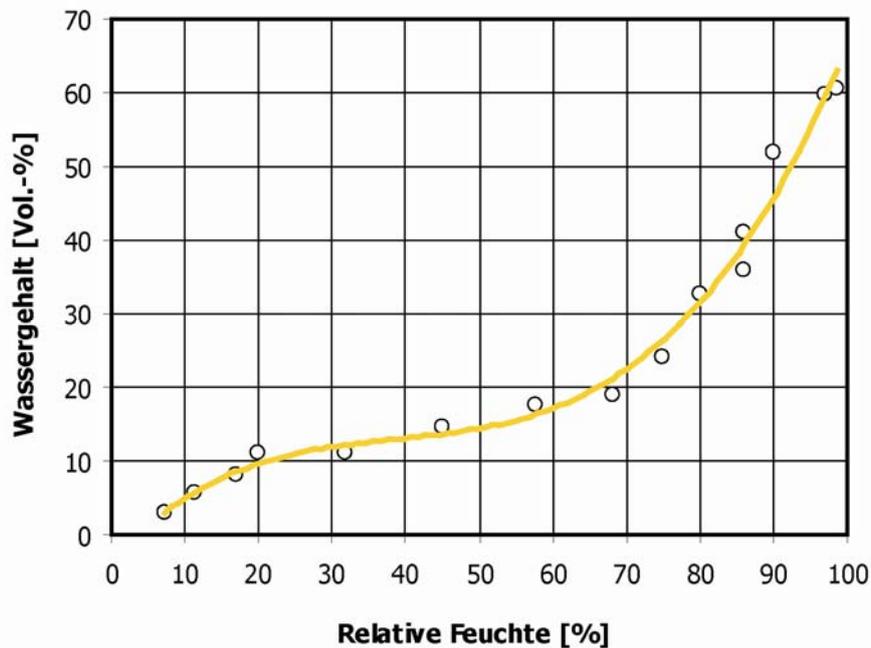


Bild 4.5: Sorptionsisotherme von Zementstein: volumenbezogener Wassergehalt von Zementstein als Funktion der relativen Luftfeuchte [103]; Versuchsbedingungen wie in Bild 4.4 angegeben

Die typischen hier beschriebenen Verschiebungen der Relaxationszeit als Funktion der Frequenz, der Temperatur und der adsorbierten Wassermenge treten auch bei Messungen an Systemen, die mit dem Zementstein vergleichbar sind, in unterschiedlich ausgeprägter Form auf. Vor allem die Systeme Silicagel-Wasser [53], Al_2O_3 -Wasser ([34], [6], [33]) und α - Fe_2O_3 -Wasser [64] verhalten sich aufgrund der großen inneren Oberfläche der Adsorbentien in ähnlicher Weise wie der Zementstein [102].

4.3.2 Relaxationszeit des Porenwassers in Beton

Die von Zech [103] an Zementstein bestimmten Relaxationszeiten des adsorbierten Wassers lassen sich im Wesentlichen auch auf den Beton übertragen.

In [1], [15], [61] wird über dielektrische Messungen an Beton berichtet. Zusätzlich wurden vom Autor am Forschungszentrum Karlsruhe sowie am Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe Messungen dielektrische Messungen an Beton in einem breiten Frequenzbereich mit einem breitbandigen HP-Netzwerkanalysator im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 20 GHz durchgeführt.

Die Messungen erfolgten an einer trockenen, einer feuchten und einer nassen Betonprobe der Serie B (siehe Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5) bei einer Temperatur von 20 °C. Dabei konnte, jenseits des von Zech für adsorbiertes Wasser bestimmten Relaxationsmaximums bei etwa 10 MHz, ein zweites ausgeprägtes, vom Wassergehalt unabhängiges, Maximum bei etwa 8 GHz beobachtet werden (vgl. Bild 4.6 rechts). Dieses Maximum ist auf die dielektrischen Eigenschaften des Wassers im Bereich der größeren Kapillaren und Grobporen zurückzuführen.

Nimmt man zur Kenntnis, dass die Relaxationsfrequenz des freien Wassers bei 17 GHz liegt, zeigt sich, dass in Beton kein freies Wasser vorliegt, sondern eine Art lose sorbiertes Wasser mit einer bestimmten Bindungsenergie. Dies zeigt, dass die Beweglichkeit der Wassermoleküle in Beton auch in größeren Kapillaren eingeschränkt ist. Auch der Depolarisationsfaktor, der die Geometrie der Einschließungen beschreibt, kann die Lage des Relaxationsmaximums einer Mischung beeinflussen und zu einer Verschiebung hin zu kleineren Relaxationszeiten führen. De Loor ([19], [20]) hat gezeigt, dass die Relaxationszeit τ_m einer Mischung wesentlich kleiner als die Relaxationszeiten τ_i der einzelnen Einschließungen ist. Dies bedeutet, dass die Relaxationsfrequenz des Wassers im Beton je nach der Geometrie der Einschließungen eventuell noch geringer als 8 GHz sein kann.

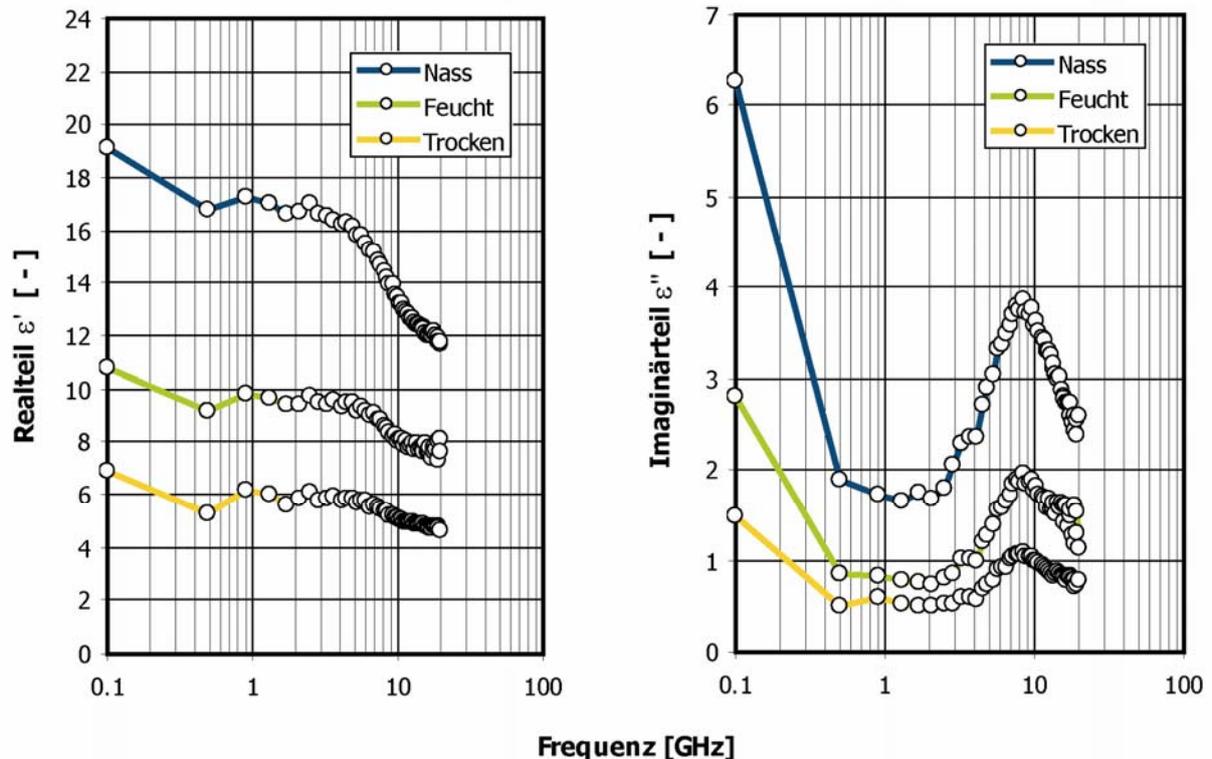


Bild 4.6: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl von Beton mit unterschiedlichem Wassergehalt als Funktion der Frequenz

Des Weiteren ist eine Verschiebung des Relaxationsmaximums aufgrund gelöster Ionen im Porenwasser unwahrscheinlich, da die chemische Zusammensetzung des Porenwassers, wie in Abschnitt 3.4.3 dargelegt, im Wesentlichen aus einfachwertigen Ionen besteht.

4.3.3 Viskosität

Die Viskosität ist ebenso wie die Relaxationszeit ein Maß für die Beweglichkeit von Flüssigkeiten. Im Bereich der sich bei Kapillarkondensation einstellenden Schichtdicken kann das vom Zementstein aufgenommene Wasser als Flüssigkeit mit einer bestimmten Viskosität betrachtet werden. Nach Debye ergibt sich zwischen Viskosität und Relaxationszeit der in Gleichung (3.18) dargestellte Zusammenhang. Demnach verhält sich die Viskosität proportional zur Relaxationszeit.

Zech [103] zeigt, dass die Beweglichkeit des Gelporenwassers um einen Faktor 10^3 bis 10^4 gegenüber freiem Wasser reduziert ist. Auch Helmuth [48] kommt zu einem derartigen Ergebnis. Er findet, dass die Viskosität des Gelporenwassers um einen Faktor 10^2 bis 10^4 ge-

genüber dem freien Wasser reduziert ist. Die Viskosität einer dreimolekularen adsorbierten Schicht kann mit der des Glycerins verglichen werden ($\eta = 1,5 \text{ Ns/m}^2$) [48]. Diese Reduzierung der Beweglichkeit zeigt deutlich den Einfluss der Oberfläche auf das Verhalten des Gelporenwassers.

Mit zunehmender Schichtdicke tritt die orientierende Wirkung der Oberfläche auf die Wassermoleküle immer mehr in den Hintergrund. Mit fallender Temperatur nimmt die Viskosität exponentiell zu. Freies Wasser hat bei 20 °C eine Viskosität von 0,001 Ns/m². Die Viskosität des Kapillarwassers des Zementsteins ist der Viskosität des freien Wassers vergleichbar, wenn auch die von Wittmann und Zech [102] bestimmten Werte um einen Faktor 20 bis 70 größer sind.

Peschel [74] erhält für 100 Å dicke Wasserschichten, die sich zwischen zwei Quarzglasplatten befinden, eine Viskosität von 0,009 Ns/m², während sich für wassergefüllte Poren mit einem Radius von 100 Å nach den Messungen von Wittmann und Zech eine Viskosität von 0,02 Ns/m² ergibt.

Peschel nimmt an, dass die Dipole, die sich nahe den Oberflächen befinden, eine orientierte Schicht bilden. Dieser Orientierungseffekt führt zu einer Erhöhung der Viskosität. Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen von Wittmann und Zech und den Messungen von Peschel lässt sich zumindest teilweise dadurch erklären, dass Peschel an einem Spalt misst, während in dem von Wittmann und Zech untersuchten Mikrogefüge des Zementsteins beliebige Porenformen vorkommen können.

Deryagin und Fedyaikin [21] berichten, dass die Viskosität des Wassers in sehr dünnen Kapillaren um 12- bis 15-mal höher ist als die des freien Wasser.

4.3.4 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der Porenlösung hat einen wesentlichen Einfluss auf einige wichtige Zementeigenschaften wie das Erstarrungsverhalten, den Korrosionsschutz der Stahlbewehrung und das Verhalten gegenüber reaktionsfähigen Zuschlägen.

Gunkel [42] hat die Zusammensetzung der flüssigen Phase bei verschiedenen Zementen und bei üblichen Wasserzementwerten während der gesamten Erstarrungs- und Erhärtungszeit bis zu 12 Monaten untersucht. Alle Zemente wurden mit Calciumchlorid über das Anmachwasser auf zwei definierte Chloridgehalte von 0,06 und 0,6 M.-% eingestellt. Die Porenlösung aus den erstarrten und erhärteten Proben wurde mit einem nach den Angaben von Longuet et al [60] aus hochfesten Stahl gebauten Drucktopf mit Drücken bis zu 500 N/mm² ausgepresst. Der Verlauf der Gesamtalkalikonzentration und der Natriumkonzentration im Verlauf der Hydratationszeit von 12 Monaten sind in Bild 4.7 am Beispiel der Proben mit dem Wasserzementwert $w/z = 0,65$ dargestellt. Zur Bildung dieser Summe wird die Kaliumkonzentration in die äquivalente Natriumkonzentration umgerechnet. Man erhält auf diese Weise den Betrag der Gesamtalkalien als äquivalente Natriumkonzentration, als so genanntes Natrium-Äquivalent. Unterhalb der Kurvenschar umschließt ein schraffiertes Feld das Gebiet der Natriumkonzentration in den Porenlösungen.

Bild 4.8 zeigt den Verlauf der Calciumkonzentration in der Porenlösung als Funktion der Zeit. Die beiden Markierungen auf der Ordinate in Bild 4.8 zeigen die zugehörigen Calciumkonzentrationen, die durch die Einstellung der Chloridgehalte der Zemente durch Auflösung von Calciumchlorid im Anmachwasser erzeugt wurden.

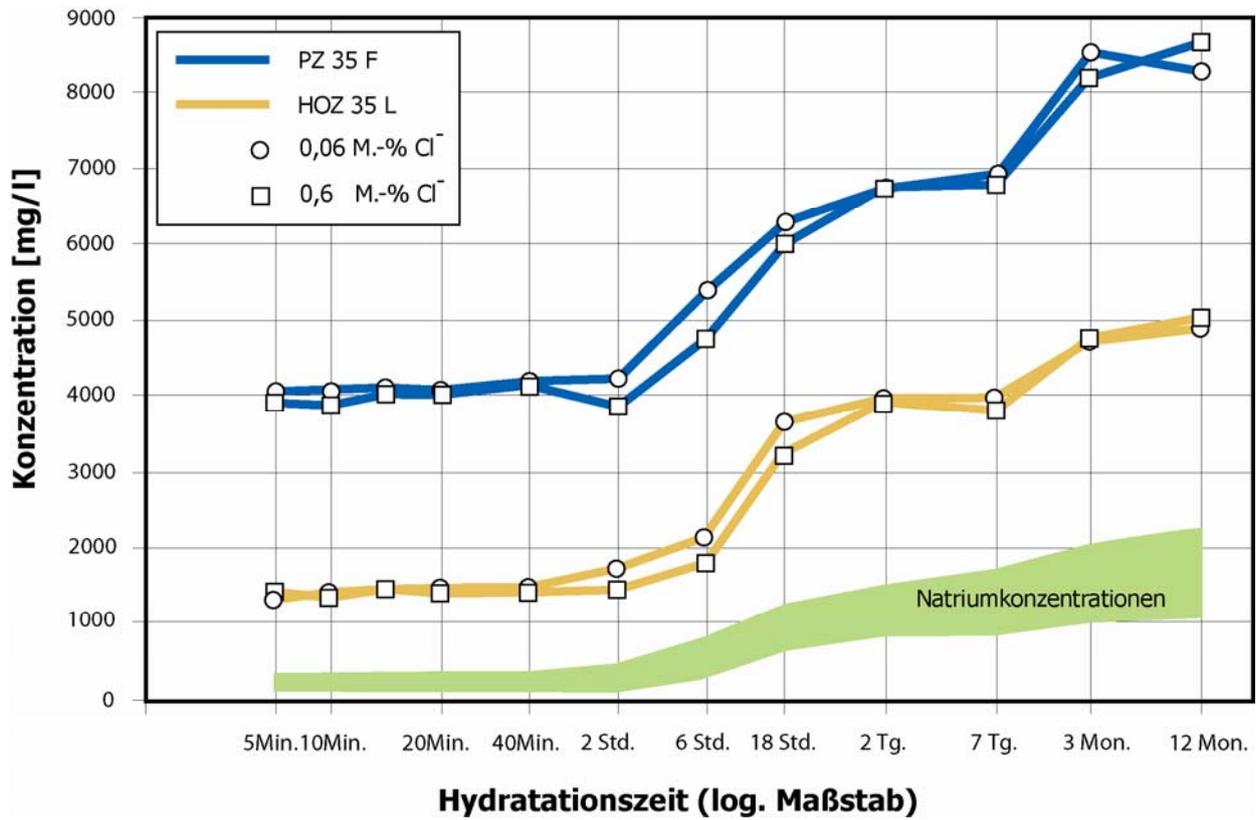


Bild 4.7: Verlauf der Gesamtalkalikonzentration (Na-Äquivalent) und der Natriumkonzentration in der Porenlösung als Funktion der Zeit nach Gunkel [42]

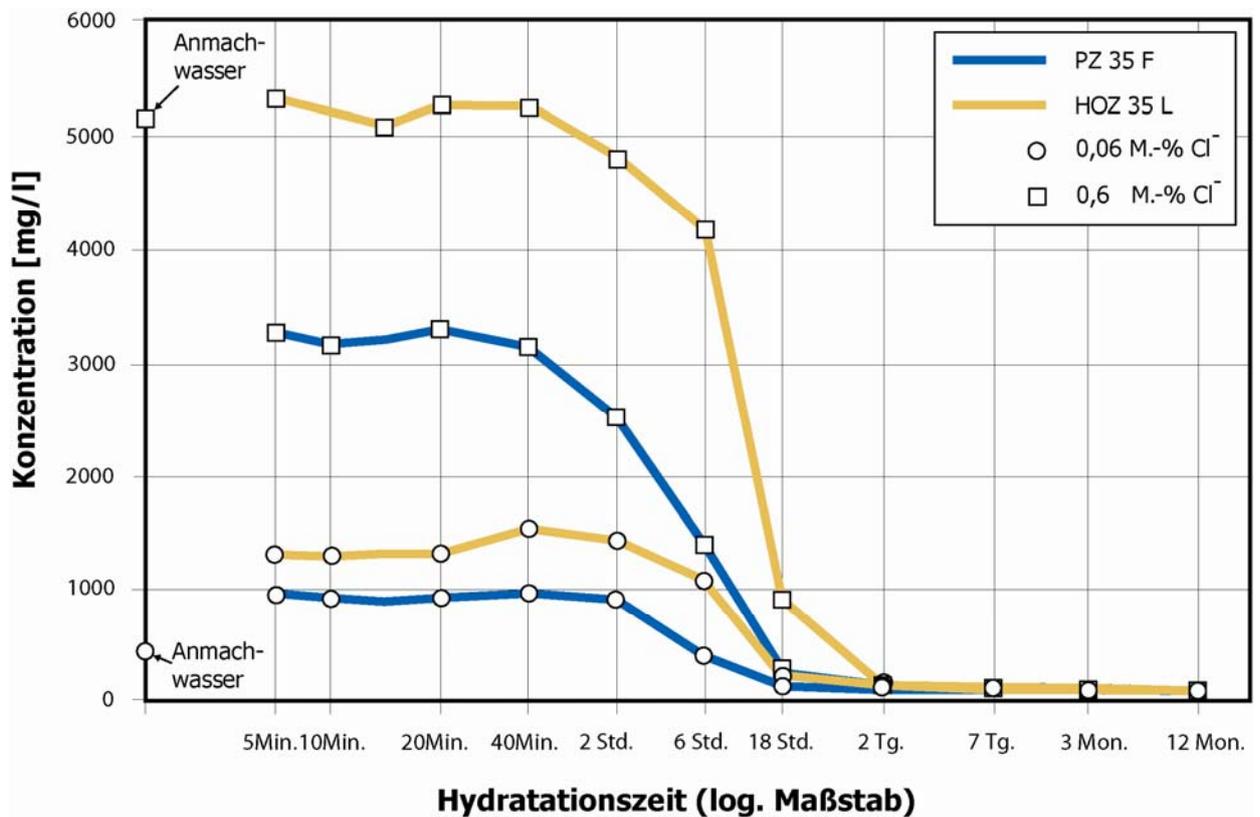


Bild 4.8: Verlauf der Calciumkonzentration in der Porenlösung als Funktion der Zeit nach Gunkel [42]

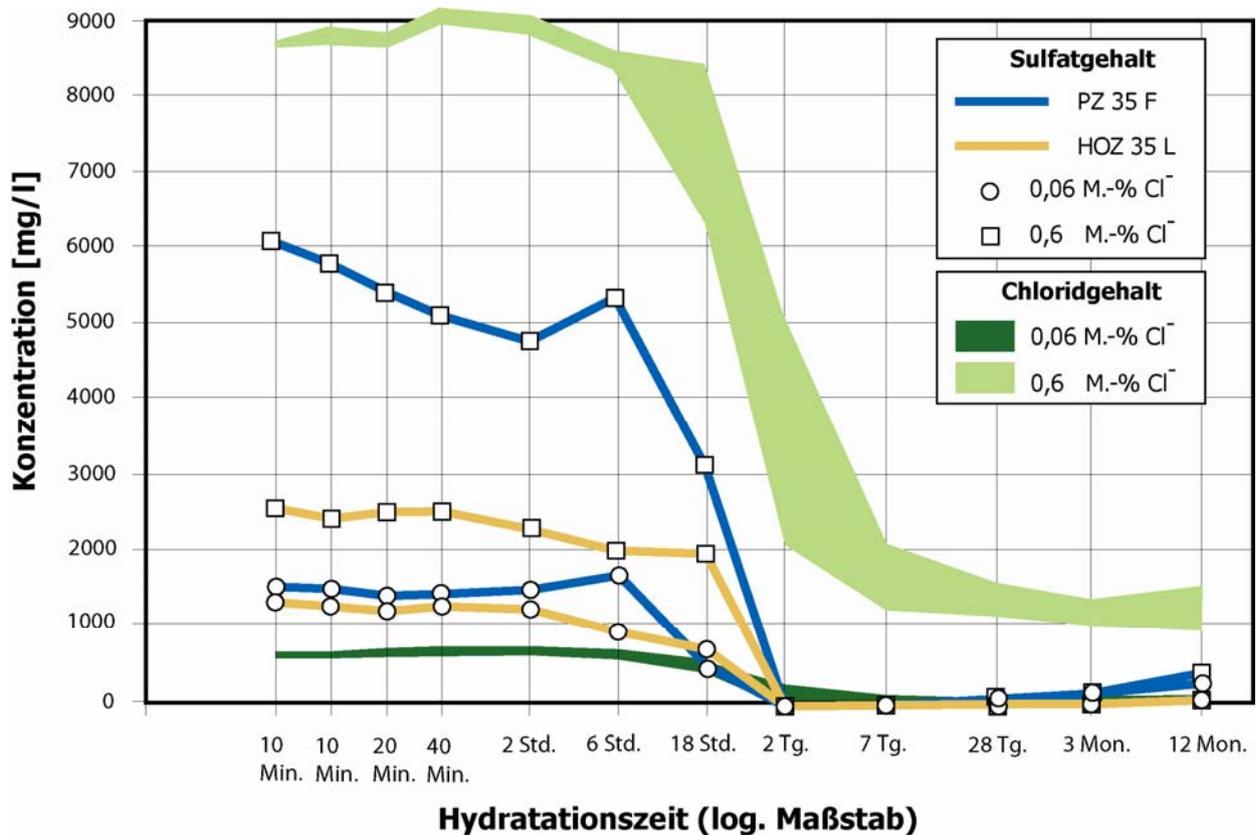


Bild 4.9: Verlauf der Sulfat- und Chloridkonzentrationen (schraffiertes Feld) in der Porenlösung als Funktion der Zeit nach Gunkel [42]

Weiterhin ist der Verlauf der Sulfat- und Chloridkonzentrationen (schraffiertes Feld) in der Porenlösung als Funktion der Zeit in Bild 4.9 ersichtlich.

Im Anfangsstadium besteht die flüssige Phase des erstarrenden Zementleims im Wesentlichen aus einer Lösung von Hydroxiden des Calciums (Bild 4.8) und der Sulfate (Bild 4.9), deren Konzentrationen sich über einen Zeitraum bis zu etwa 6 Stunden nur wenig verändern. Der pH-Wert liegt zwischen 12,7 und 12,9. In der Zeit zwischen 6 Stunden und 2 Tagen verschwindet Calcium und Sulfat aufgrund der beim Erstarren und Erhärten ablaufenden Hydrationsreaktionen bis auf geringe Restkonzentrationen, während die Alkalien als Hydroxid weiter in Lösung gehen und der pH-Wert über 13 ansteigt. Die Porenlösung des erhärteten Zementsteins ist dann im Wesentlichen eine starke Alkalihydroxidlösung. Chlorid wird bei Gehalten von 0,06 M.-% durch die Hydratphasen des Zementsteins während den ersten 2 Tagen fast vollständig gebunden. Bei höherem Chloridzusatz von 0,6 M.-% wird zwar ebenfalls der größte Teil gebunden, es verbleiben jedoch von der Zementart abhängige Konzentrationen von mehr als 1000 mg/l in der Porenlösung (vgl. Bild 4.9).

Aus dieser Ausführung geht hervor, dass die Porenlösung im Wesentlichen aus einer 1-1wertigen Elektrolytlösung besteht und damit ein weitgehend ähnliches dielektrisches Verhalten wie reines Wasser zeigt und kaum oder gar nicht eigene relaxierende Polarisationsanteile liefert, sondern lediglich die Orientierungspolarisation des Wassers verringert.

5 Messverfahren und Auswertung der Messungen

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden 10 verschiedene Betone unter Verwendung eines CEM I- bzw. CEM III-Zementes mit Wasserzementwerten von 0,45 und 0,65 und einem Größtkorn von 8; 16 und 32 mm hergestellt (siehe Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5).

Bei den Feuchtemessungen wurde der Einfluss der Betontemperatur, des Größtkorns des Betons, des Bewehrungsgrads, des Salzgehaltes, des Betonalters (Hydratationsgrad) und der Nachbehandlungsdauer untersucht.

Bei ausgewählten Prüfserien wurde mit Oberflächensensoren unterschiedlichen Durchmessers gearbeitet, um damit die Möglichkeit zu erkunden, ob über die verschiedene Tiefenwirkung dieser Sensoren zerstörungsfrei das Feuchteprofil des Betons dielektrisch erfasst werden kann. Die Messungen erfolgten in unterschiedlichem Alter während eines Zeitraumes von bis zu einem Jahr.

Die Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von Materialien beruht auf der Wechselwirkung zwischen dem zu untersuchenden Material und einem angelegten elektromagnetischen Feld. Dazu wird das Material in das elektromagnetische Feld eines Sensors gebracht. Das Messverfahren basiert auf dem Reflexionsverfahren. Dabei werden die Phasenverschiebung der Welle und die Dämpfung im Medium mittels eines vektoriellen Netzwerkanalysators gemessen. Grundlegende Voraussetzung zur Bestimmung der komplexen Permittivitätszahl des untersuchten Mediums ist die genaue Beschreibung des elektromagnetischen Verhaltens des Sensors. Dazu sind feldtheoretische Untersuchungen erforderlich, mit denen sich die Beziehung zwischen Permittivitätszahl und Reflexionsfaktor bestimmen lässt.

Die dielektrischen Messungen wurden mit einer Koaxialleitung mit offenem Ende durchgeführt (siehe Bild 5.1). Dieser Sensortyp findet eine weite Verbreitung, was durch zahlreiche Veröffentlichungen dokumentiert ist [79]. Die elektromagnetischen Eigenschaften des Sensors wurden in Abhängigkeit von der Frequenz und der komplexen Permittivitätszahl des anliegenden Mediums mit der Mode-Matching Methode nach Mosig [68] sowie durch numerische Feldberechnungen des Finite-Integration-Softwarepakets MAFIA (MAFIA steht als Akronym für die Lösung der Maxwellgleichungen mit Hilfe des Finiten Integrations-Algorithmus) [96] berechnet. Zudem wurden die Eindringtiefe des elektrischen Feldes im Medium und der Abfall des elektrischen Feldes senkrecht zur Sensorebene mit Hilfe von MAFIA numerisch ermittelt.

In Bild 5.1 ist der Querschnitt des Sensors dargestellt, wobei a der Radius des Innenleiters, b der Radius des Außenleiters und c der Radius des Flansches ist. Teflon dient als Isolation zwischen Innen- und Außenleiter. Das Messvolumen ist schematisch als Halbkreis dargestellt.

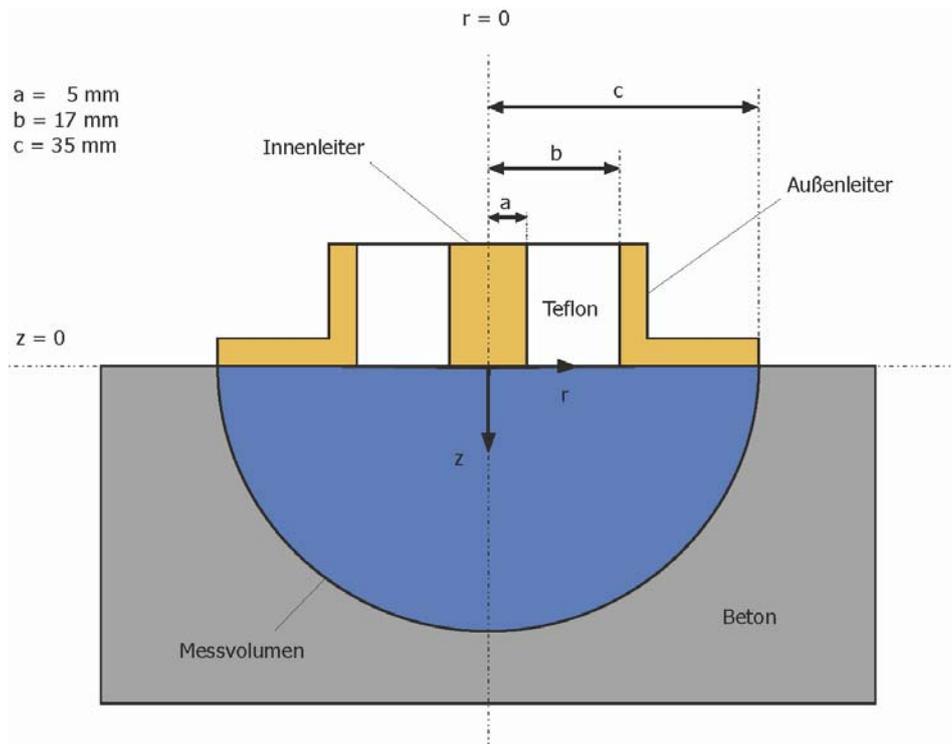


Bild 5.1: Schematische Darstellung einer Koaxialleitung mit offenem Ende am Beispiel des Sensors B

5.1 Messprinzip

Dem Messprinzip liegt zugrunde, dass die in einer Koaxialleitung fortschreitende Hochfrequenzwelle am offenen Ende der Leitung reflektiert wird. Das Ende der Leitung mit seiner Streukapazität entspricht einem Sensor mit einer bestimmten Impedanz Z . Wird ein Medium an dem Sensor angebracht, so wird diese Impedanz und somit auch der Reflexionsfaktor verändert. Wird in einer verlustlosen Koaxialleitung mit einer charakteristischen Impedanz Z_0 ein anregendes Signal eingespeist, so breitet sich eine TEM-Welle (transversal-elektromagnetisch) aus. An der Übergangsstelle vom Koaxialleiter zum offenen Halbraum werden eine TEM-Welle und aperiodisch gedämpfte höhere Moden reflektiert, während im offenen Halbraum aperiodisch gedämpfte Wellen transmittiert werden. Dabei darf die elektromagnetische Welle eine obere Frequenzgrenze, die so genannte Grenzfrequenz, nicht überschreiten, um die aperiodische Dämpfung der höheren Moden zu gewährleisten. An der Übergangsstelle vom Koaxialleiter zum offenen Halbraum bildet sich ein Reflexionsfaktor Γ_0 aus, der allgemein von der Impedanz Z abhängt:

$$\Gamma_0 = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (5.1)$$

Hierbei ist Z_0 die charakteristische Impedanz der Koaxialleitung in $[\Omega]$. Bei Koaxialleitungen beträgt die charakteristische Impedanz in der Regel $Z_0 = 50 \Omega$ und wird durch die Permittivitätszahl des Isolationsmaterials und die Dimension des Leiters wie folgt bestimmt:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_c}} \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (5.2)$$

dabei sind:

ε_c die Permittivitätszahl des Isolators zwischen Innen- und Außenleiter. Für Teflon gilt
 $\varepsilon_c = 2,15 - j \cdot 0$

a, b der Innen- bzw. Außenradius der Koaxialleitung

Um die Verluste, verursacht durch Abstrahlung sowie durch verlustbehaftete Medien, zu charakterisieren, muss im Ersatzschaltbild des Sensors parallel zur Kapazität C ein Leitwert G geschaltet werden, wobei G die Summe aus den Abstrahlverlusten G_R und den dielektrischen Verlusten G_D repräsentiert. Dabei wird berücksichtigt, dass sich die Eigenschaften des Sensors, aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens über den Frequenzbereich und der Verkürzung der Wellenlänge im Dielektrikum, in Abhängigkeit von der Frequenz und der Permittivitätszahl des anliegenden Mediums ändern.

In Abhängigkeit von der Frequenz und dem anliegenden Medium ergibt sich die Impedanz Z gemäß Gl. (5.3), wobei die dielektrischen Verluste G_D aus der Kapazität C herrühren [90]:

$$Z = \frac{1}{G_R + j \cdot \omega \cdot C} \quad (5.3)$$

Darin sind:

G_R die Abstrahlungsverluste [Siemens]

ω die Kreisfrequenz [Hz]

C die Kapazität des Sensors [Farad]

Unter Berücksichtigung, dass $C = C_0 \cdot \varepsilon_m = C_0 \cdot (\varepsilon' + j \cdot \varepsilon'')$, mit C_0 als Leerlaufkapazität bzw. Streukapazität des Sensors im Vakuum und ε_m als komplexe Permittivitätszahl des Mediums, ergibt sich die Impedanz Z gemäß Gleichung (5.4) für verlustbehaftete Dielektrika zu:

$$Z = \frac{1}{(G_R + \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon'') + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon'} \quad (5.4)$$

Dabei stellen $G_D = \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon''$ die dielektrischen und $G = G_R + G_D$ die gesamten Verluste dar.

Für den Reflexionsfaktor ergibt sich nun durch Einsetzen von Gleichung (5.4) in Gleichung (5.1):

$$\Gamma_0 = \frac{1 - Z_0 \cdot [(G_R + \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon'') + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon']}{1 + Z_0 \cdot [(G_R + \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon'') + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon']} \quad (5.5)$$

Durch die Bestimmung des Reflexionsfaktors Γ_0 und Auflösung der Gleichung (5.5) nach $\varepsilon_m = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon''$ erhält man die Lösung zur Berechnung der gesuchten Permittivitätszahl:

$$\varepsilon_m = -j \cdot \frac{1 - Z_0 \cdot G_R - \Gamma_0 \cdot (1 + Z_0 \cdot G_R)}{Z_0 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot (\Gamma_0 + 1)} \quad (5.6)$$

Wie aus Gleichung (5.6) zu erkennen ist, werden die Leerlaufkapazität C_0 und die Abstrahlungsverluste G_R des Sensors benötigt, um aus dem Reflexionsfaktor Γ_0 die komplexe Permittivitätszahl ε_r zu ermitteln.

5.2 Gestaltung der Messsensoren und des Messaufbaus

Zur Durchführung der umfangreichen experimentellen Untersuchungen, mit dem Ziel, zerstörungsfrei das Feuchteprofil des Betons dielektrisch zu erfassen, wurden vier Sensoren des Typs Koaxialleitung mit offenem Ende mit einer konstanten charakteristischen Impedanz von 50 Ohm hergestellt. Die Innen- und Außenleiter wurden aus Messing gefertigt, während als Isolationsmaterial Teflon verwendet wurde (siehe Bild 5.2). Um die Reflexionen am Übergang zwischen den unterschiedlichen Querschnitten der Koaxialleitung und des Sensors so gering wie möglich zu halten, wurde bei der Konstruktion ein Konusübergang, bestehend aus zwei Kegeln mit gemeinsamer Spitze, realisiert [67]. Der Zusammenhang zwischen der charakteristischen Impedanz und dem Kegelwinkel ist in Gleichung (5.7) wiedergegeben [67]:

$$Z_0 = \frac{Z_{F0}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_c}} \cdot \ln \frac{\tan(\vartheta_2 / 2)}{\tan(\vartheta_1 / 2)} \quad (5.7)$$

Hierbei sind:

Z_0 die charakteristische Impedanz, $Z_0 = 50$ Ohm

Z_{F0} der Feldwellenwiderstand des freien Raums, $Z_{F0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377$ Ohm, mit der elektrischen Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm und der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am

ε_c die Permittivitätszahl des Teflons

ϑ_1 der Winkel des Innenkegels

ϑ_2 der Winkel des Außenkegels

Eine Übersicht über die hergestellten Sensoren und deren Abmessungen ist in Tabelle 5.1 gegeben.

Tabelle 5.1: Übersicht über die hergestellten Sensoren und deren Abmessungen

Sensor	Innenleiterradius [mm]	Außenleiterradius [mm]	Flanschradius [mm]
A	1,50	5,09	12,70
B	5,01	17,00	40,00
C	8,25	28,00	67,50
D	11,49	39,00	95,00

In Bild 5.2 ist die Konstruktionszeichnung des Sensors B dargestellt.

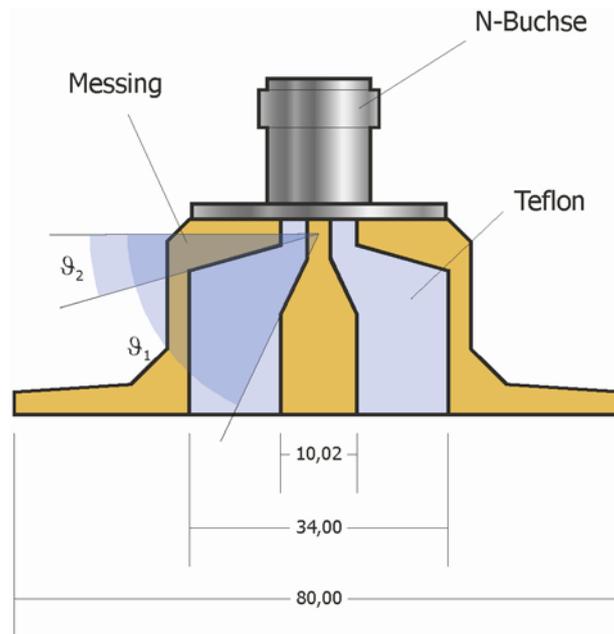


Bild 5.2: Konstruktionszeichnung des Sensors B, Abmessungen in [mm]

Zu Beginn der Arbeiten wurde die in Bild 5.3 gezeigte Messanordnung verwendet. Sie bestand aus einem Hochfrequenzgenerator (Wavetek 3520) mit der Frequenzbandbreite von 1 MHz bis 2080 MHz, einem 2-Wege-Richtkoppler (HP-788 D), um einen Teil der einfallenden und der reflektierten Welle auszukoppeln und einem Vektorvoltmeter (HP-8508 A) mit Eingangsmodul (HP-85082 A), um den Reflexionsfaktor zu bestimmen sowie einem PC, einem digitalen Voltmeter und einem Oberflächen-Temperaturfühler zur Messung der Betontemperatur.

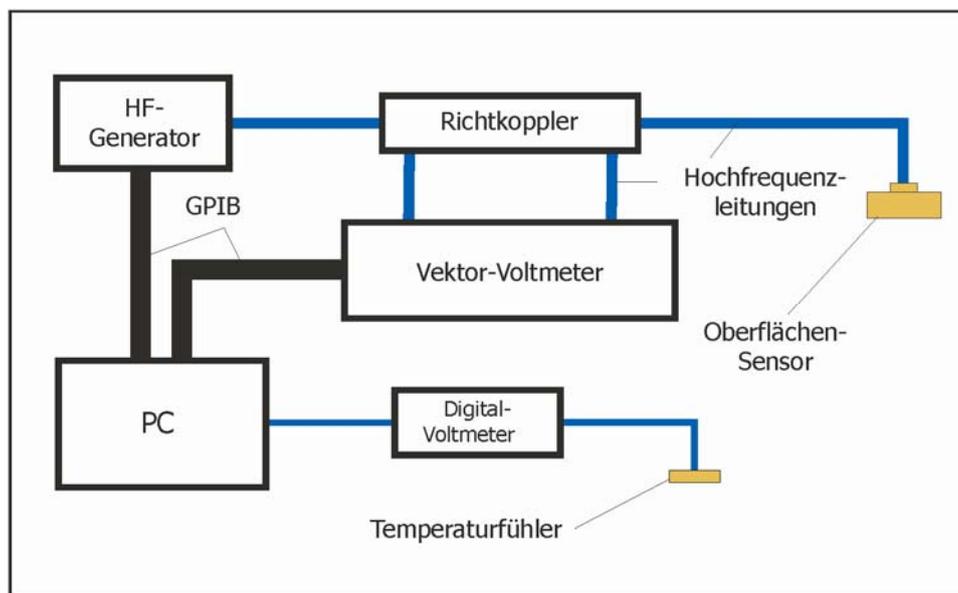


Bild 5.3: Schematischer Aufbau des ursprünglichen Messplatzes

Im Zuge der Untersuchungen wurde ein Netzwerkanalysator (HP-8712 ET) angeschafft. Bild 5.4 zeigt den neueren Messplatz zusammen mit den Sensoren und einem Notebook zur Steuerung und Auswertung der Messungen.



Bild 5.4: Messplatz zur Bestimmung der Permittivitätszahl. Im Bild sind der Netzwerkanalysator (HP 8712 ET), ein Notebook zur Steuerung und die Sensoren A, B, C und D (von links nach rechts) zu erkennen. Die Radien der Sensoren sind in Tabelle 5.1 angegeben

Die gesamte Anordnung wird mittels PC über den GPIB (General Purpose Interface Bus) gesteuert. Um den ganzen Messablauf und die Kalibrierung der ganzen Messanordnung zu bewältigen, wurde ein Steuer- und Auswerteprogramm entwickelt. Das Programm zeigt die Permittivitätszahl nach jeder erfolgten Messung, frequenzabhängig, zusammen mit einer graphischen Darstellung des Reflexionsfaktors in Polarkoordinaten, an (siehe Bild 5.4).

5.3 Berechnung des elektromagnetischen Feldes der Sensoren

Die Berechnung des elektromagnetischen Feldes ist die Voraussetzung zur frequenzabhängigen Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Reflexionsfaktor und Permittivitätszahl für die unterschiedlichen Sensoren. Dabei wird für unterschiedliche Permittivitätszahlen der entsprechende Reflexionsfaktor berechnet. Hierbei wird sowohl der Realteil als auch der Imaginärteil der Permittivitätszahl variiert. Somit erhält jeder Sensor Kalibrationsdaten anhand derer später vom gemessenen Reflexionsfaktor auf die entsprechende Permittivitätszahl rückgeschlossen werden kann.

Die Berechnung des elektromagnetischen Feldes wurde mit zwei Methoden durchgeführt: analytisch mit der Mode-Matching Methode nach Mosig [68] und numerisch mit der Finite-Elemente-Simulations-Software MAFIA. Anschließend wurden beide Berechnungsmethoden miteinander verglichen.

5.3.1 Mode-Matching Methode

Bei der Feldberechnung des Koaxialleiters mit offenem Ende nach der Mode-Matching Methode wird vorausgesetzt, dass der Koaxialleiter mit einem homogenen, verlustlosen Dielektrikum der Permittivitätszahl ϵ_c gefüllt und in der Ebene $z=0$ an einem metallischen

Flansch, der senkrecht zur Ausbreitungsrichtung theoretisch unendlich ausgedehnt ist, angeschlossen ist. Zudem wird vorausgesetzt, dass der Koaxialleiter und der Sensor rotations-symmetrisch sind. Aufgrund dieser Symmetrie können die an der Diskontinuität angeregten höheren Moden nur TM_{0n} -Moden sein [50].

Das Ausbreitungsverhalten wird im Wesentlichen durch die Abmessungen des Sensors, die Betriebsfrequenz und die Permittivitätszahl des anliegenden Mediums bestimmt. Dabei wird das Medium als homogen, isotrop, linear und nichtmagnetisch betrachtet ([67], [98]).

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich nach Mosig [68] für den Koaxialleiter $z < 0$ folgender Ansatz:

$$E_r = U_0 \left[f_0(r) \cdot \exp(-\gamma_0 z) + \sum_{n=0}^{\infty} \Gamma_n f_n(r) \cdot \exp(\gamma_n z) \right] \quad (5.8)$$

$$H_\varphi = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_c \cdot U_0 \cdot \left[\frac{f_0(r)}{\gamma_0} \cdot \exp(-\gamma_0 \cdot z) - \sum_{n=0}^{\infty} R_n \cdot \frac{f_n(r)}{\gamma_n} \cdot \exp(\gamma_n \cdot z) \right] \quad (5.9)$$

$$f_0(r) = \frac{N_0}{r}, f_n(r) = N_n \left[J_1(p_n \cdot r) \cdot Y_0(p_n \cdot a) - Y_1(p_n \cdot r) \cdot J_0(p_n \cdot a) \right] \quad (5.10)$$

$$N_0 = \frac{1}{\sqrt{\ln(b/a)}}, N_n = \frac{\pi \cdot p_n}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{J_0^2(p_n \cdot a)}{J_0^2(p_n \cdot b)} - 1} \quad (5.11)$$

$$\gamma_0 = j \cdot \sqrt{\varepsilon_c} \cdot (\omega / c_0), \gamma_n = d_n = \sqrt{p_n^2 - \varepsilon_c (\omega / c_0)^2} \quad (5.12)$$

Wobei E_r die elektrische Feldstärke in [V/m], H_φ die magnetische Feldstärke im ganzen Halbraum in [A/m] und U_0 die elektrische Spannung in [Volt] ist. Mit a ist der Radius des Innenleiters in [mm], mit b der Radius des Außenleiters in [mm] bezeichnet.

In den Feldgleichungen ist Γ_0 der Reflexionsfaktor der TEM-Welle und Γ_n mit $n > 0$ die Reflexionsfaktoren der TM_{0n} -Moden. Die Funktionen f_0, f_n geben die radiale Abhängigkeit der Feldverteilung an. N_0, N_n sind hierbei Normalisierungsfaktoren. Der Ausbreitungskoeffizient γ_0 ist für die TEM-Welle zuständig, während γ_n den Dämpfungskoeffizienten der höheren TM_{0n} -Moden beschreibt. Die Eigenwerte der Moden p_n mit $n > 0$ können aus den Besselfunktionen Y_0 und J_0 nach folgender Gleichung berechnet werden [50]:

$$Y_0(p_n \cdot a) \cdot J_0(p_n \cdot b) = J_0(p_n \cdot a) \cdot Y_0(p_n \cdot b) \quad (5.13)$$

Mit diesen Angaben ist die Feldverteilung in der Koaxialleitung bis auf die Reflexionsfaktoren gegeben.

Für die Felder im Halbraum $z > 0$ muss eine ähnliche Betrachtung durchgeführt werden. Hier lässt sich die magnetische Feldstärke H_φ im ganzen Halbraum durch die elektrische Feldstärke E_r ausdrücken [50]:

$$H_\varphi(r, z) = \frac{j \cdot \varepsilon_r \cdot (\omega / c_0)^2}{2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \mu_0} \cdot \int_a^b \int_0^{2\pi} E_r(r') \frac{\exp(-j \cdot (\omega / c_0) \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \cdot r)}{r} \cdot \rho' \cdot \cos \psi \cdot d\rho' \cdot d\psi \quad (5.14)$$

mit:

$$\psi = (\varphi - \varphi') \quad (5.15)$$

$$r = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2 \cdot \rho \cdot \rho' \cdot \cos \psi + z^2} \quad (5.16)$$

dabei gilt:

$$H_\varphi(\rho, z = 0^-) = H_\varphi(\rho, z = 0^+) \quad (5.17)$$

Das magnetische Feld im offenen Halbraum erhält man durch Einsetzen von Gleichung (5.8) in Gleichung (5.14). Die Randbedingungen ergeben sich aus [50]:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \Gamma_n \cdot T_n = 1 \quad (5.18)$$

mit:

$$T_n = \frac{f_n(\rho) / \gamma_n + (\varepsilon_r / \varepsilon_c) \cdot I_n}{f_0(\rho) / \gamma_0 - (\varepsilon_r / \varepsilon_c) \cdot I_0} \quad (5.19)$$

$$I_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_a^b f_n(\rho') \cdot \rho' \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\exp(-j \cdot (\omega / c_0) \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \cdot r)}{r} \cdot \cos \psi \cdot d\psi \cdot d\rho' \quad (5.20)$$

Die numerische Lösung des Gleichungssystems kann nur für eine endliche Zahl von Moden auf diskreten Kreiskonturen in der Ebene $z = 0$ angegeben werden. Auf diese Weise kann der Eingangreflexionsfaktor für die TEM-Grundmoden bestimmt werden. Zur Lösung dieses Problems wurde das von Hübner [50] entwickelte Programm KOAX angewendet. Aufgrund der in den Integralgleichungen auftretenden elliptischen Integrale mit Singularitäten ist die numerische Auswertung relativ zeitaufwendig.

Ist der Reflexionsfaktor Γ_0 bekannt, so kann die Admittanz (Kehrwert der Impedanz) des Sensors Y nach folgender Gleichung angegeben werden:

$$Y = \frac{1 - \Gamma_0}{Z_0 \cdot (1 + \Gamma_0)} \quad (5.21)$$

Die Leerlaufkapazität sowie der Leitwert des Sensors können somit nach Gleichung (5.4) wie folgt bestimmt werden:

$$C_0 = \frac{\text{Im}(Y)}{\omega \cdot \varepsilon'} \quad (5.22)$$

$$G = \text{Re}(Y) = G_R + \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon'' \quad (5.23)$$

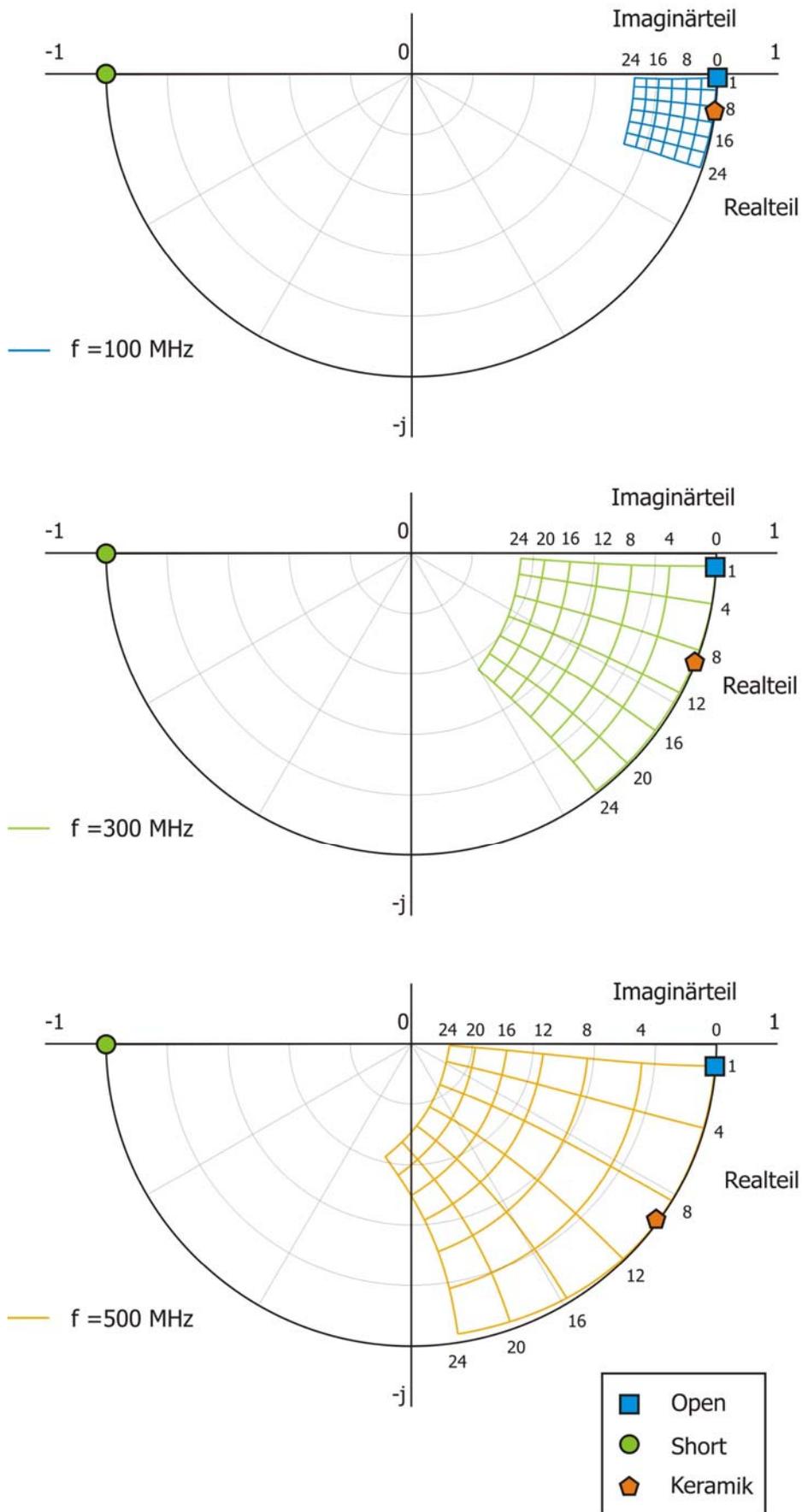


Bild 5.5: Reflexionsfaktorebenen am Beispiel des Sensors B berechnet mit $n = 10$ Moden bei den Frequenzen 100, 300 und 500 MHz mit den zugehörigen Kalibrierstandards

Die Feldberechnungen der Sensoren erfolgten für den Frequenzbereich 100 MHz bis 500 MHz mit einem Frequenzabstand von 50 MHz. Bild 5.5 zeigt in Polarkoordinaten am Beispiel des Sensors B den Verlauf des mit $n = 10$ Moden berechneten Reflexionsfaktors Γ_0 in Abhängigkeit der Permittivitätszahl des anliegenden Mediums bei verschiedenen Frequenzen. Hierbei variiert die Permittivitätszahl des Mediums zwischen 1 und 24 für den Realteil und zwischen 0 und 24 für den Imaginärteil. Zusätzlich sind in Bild 5.5 die Reflexionsfaktoren der Kalibrierstandards Open, Short und Keramik frequenzabhängig dargestellt.

Aus diesen Daten kann nun bei erfolgter Messung des Reflexionsfaktors auf die entsprechende komplexe Permittivitätszahl rückgeschlossen werden.

5.3.2 Numerische Feldberechnungen mit MAFIA

MAFIA ist ein interaktives Programmpaket zur Berechnung elektromagnetischer Felder. Es basiert auf den fundamentalen Gleichungen der elektromagnetischen Theorie, den Maxwell-Gleichungen. Mit MAFIA können nahezu alle Feldprobleme in beliebigen Geometrien gelöst werden.

Die Methode zur Lösung der Maxwell-Gleichungen beruht auf der Finiten-Integrations-Theorie. Dazu wird das zu untersuchende Raumgebiet durch Zellen diskretisiert. Die Maxwell-Gleichungen in Integraldarstellung werden durch Mittelwerte auf den Seitenmitten bzw. Flächenmittelpunkten approximiert. Man erhält ein Gleichungssystem, das durch bekannte Methoden gelöst werden kann. Dieses Verfahren ist sehr flexibel und arbeitet äußerst genau, da in jeder Zelle im Prinzip verschiedene Materialkonstanten gewählt werden können (Permittivität, Permeabilität und Leitfähigkeit). Außerdem werden nach jedem Zeitschritt bzw. für jeden Mode die Lösungen in die Maxwell-Gleichungen eingesetzt und verifiziert [97].

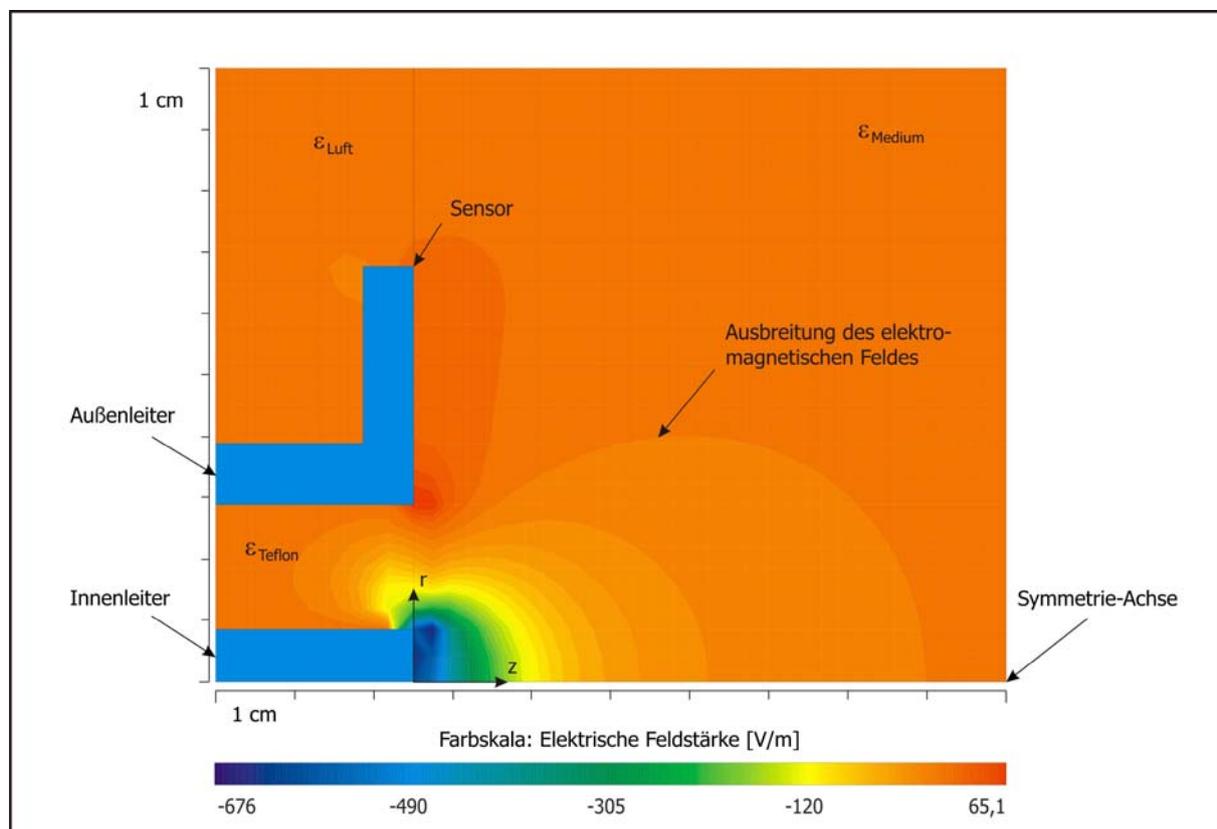


Bild 5.6: Elektrische Feldstärkenverteilung in einem Medium der Permittivitätszahl $\epsilon_m = 15 - j \cdot 0$ bei einer Frequenz von 250 MHz (Abmessungen in [cm])

Bei den Berechnungen wurde die Rotationssymmetrie des Sensors ausgenutzt, was mit erheblichen Vorteilen bezüglich Rechenzeit und Speicherkapazität verbunden ist. Die Berechnungen der unterschiedlich großen Sensoren wurden bei gleich bleibender Zellengröße durchgeführt. Für den Sensor C ergaben sich z. B. 12000 Gitterpunkte.

In Bild 5.6 ist am Beispiel des Sensors C die elektrische Feldstärkenverteilung in r- und z-Richtung visualisiert. Man kann hier an der Farbskala der elektrischen Feldstärke erkennen, inwieweit das elektrische Feld in das Medium eindringt.

Ein stichprobenartige Überprüfung der mit MAFIA und der Mode-Matching Methode ermittelten Ergebnisse zeigte eine sehr gute Übereinstimmung in den Reflexionsfaktoren bzw. Kapazitäten und Leitwerten.

Die unterschiedlichen Eindringtiefen der Sensoren und der Abfall der elektrischen Feldstärke senkrecht zur Sensorebene wurden ebenfalls mit MAFIA bestimmt. Hierbei wurde der Betrag des Feldstärkenvektors an der Symmetrieachse $r = 0$ als Funktion des Abstands z von der Sensorebene ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass der Verlauf der normierten Feldstärke (Bezugsgröße ist hierbei die maximale Feldstärke E_{\max}) in Abhängigkeit des Abstands mit einer einfachen e-Funktion ausreichend genau beschrieben werden kann (vgl. Bild 5.7). Dabei wurde für den Sensor A, aufgrund der minimalen Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes, eine Eindringtiefe von $z = 0$ angenommen.

$$E_{\text{norm}} = \exp(-Q \cdot z) \quad (5.24)$$

In diesem Zusammenhang wurde zunächst für jeden Sensor eine spezifische Eindringtiefe bzw. einen spezifischen Schwerpunkt \bar{z} ermittelt. Dieser Schwerpunkt des ebenen Flächenstückes (siehe Bild 5.7), das von der Gleichung $E_{\text{norm}} = \exp(-Q \cdot z)$ dargestellt und den Achsen des Koordinatensystems begrenzt wird, wurde nach [7] berechnet:

$$\bar{z}_s = \frac{\int_0^{\infty} z \cdot \exp(-Q \cdot z) \cdot dz}{\int_0^{\infty} \exp(-Q \cdot z) \cdot dz} \quad (5.25)$$

Die berechneten spezifischen Eindringtiefen sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

Tabelle 5.2: Spezifischer Schwerpunkt bzw. spezifische Eindringtiefe der Sensoren

Sensor	Spezifische Eindringtiefe [cm]
A	0
B	0,704
C	1,190
D	1,562

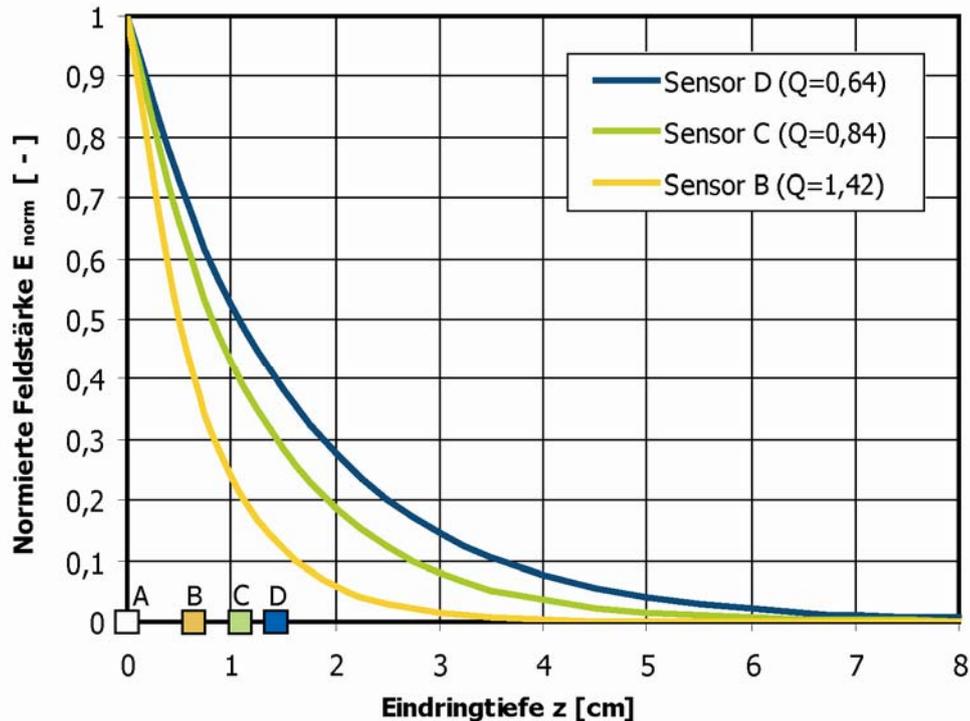


Bild 5.7: Normierter Betrag des elektrischen Feldstärkevektors an der Symmetrieachse als Funktion des Abstands zur Sensorebene für die Sensoren B, C und D (bei einer Frequenz von 250 MHz und einer Permittivitätszahl des Mediums von $\varepsilon = 10 - j \cdot 0$). Zusätzlich sind die spezifischen Eindringtiefen der Sensoren A bis D nach Tabelle 5.2 dargestellt

Mit der oben erwähnten Schwerpunktbetrachtung ist es nun möglich dem errechneten integralen Wassergehalt einer Einzelmessung eine spezifische Eindringtiefe bzw. eine Position auf der z-Koordinate zuzuordnen.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Frequenz und des Real- und Imaginärteils der Permittivitätszahl des Mediums auf die Feldstärkenverteilung mit MAFIA systematisch untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die untersuchten Parameter die Feldstärkenverteilung und somit die Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder beeinflussen. Demnach müsste die Abhängigkeit der Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder von der Frequenz und den dielektrischen Eigenschaften des untersuchten Mediums in die Berechnung einbezogen werden.

In Bild 5.8 ist am Beispiel des Sensors B der in Gleichung (5.24) vorkommende Parameter Q in Abhängigkeit vom Realteil der Permittivitätszahl ε' bei den Frequenzen 100, 250 und 500 MHz aufgetragen. Man kann hier jedoch erkennen, dass sich der Parameter Q im relevanten Bereich für Beton zwischen $5 < \varepsilon' < 15$ und im angewendeten Frequenzbereich zwischen 100 und 500 MHz nur geringfügig ändert und damit für die Messgenauigkeit unwesentlich ist. Aus diesem Grund wird der Verlauf der normierten Feldstärke in Abhängigkeit vom Abstand für jeden Sensor nach Bild 5.7 näherungsweise als konstant angenommen.

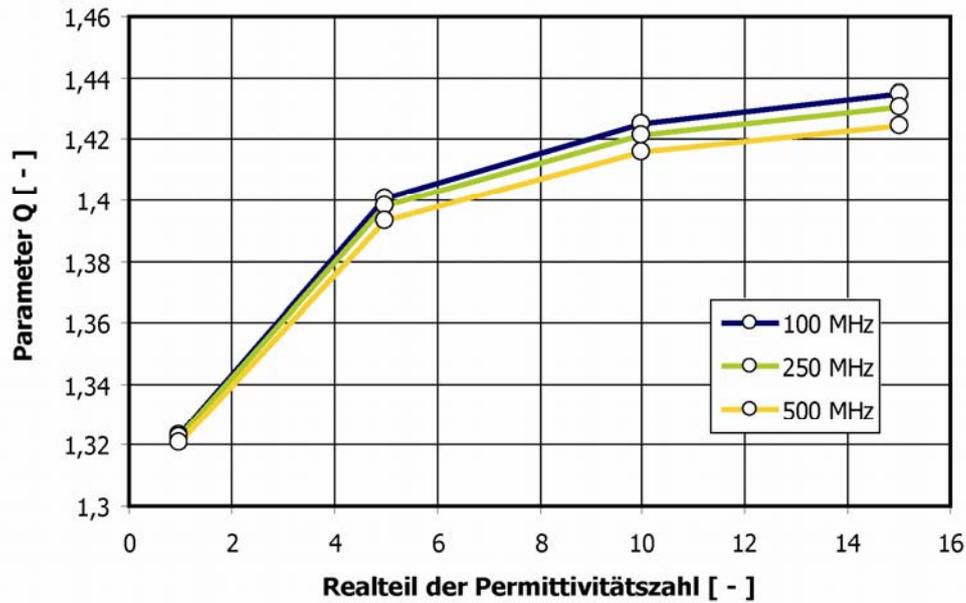


Bild 5.8: Parameter Q in Gleichung (5.24) in Abhängigkeit vom Realteil der Permittivitätszahl bei den Frequenzen 100, 250 und 500 MHz am Beispiel des Sensors B

5.4 Kalibration des Messsystems

Ein Hochfrequenz-Messsystem besitzt auf Grund seiner nichtidealen Eigenschaften systematische Fehler. Diese Fehler werden durch Stoßstellen der Verbindungen, durch die Fehler des Richtkopplers und durch die transformatorische Wirkung der Leitungslängen der Verbindungskabel hervorgerufen. Der gemessene Eingangsreflexionsfaktor ρ_m stimmt deshalb nicht mit dem wahren Eingangsreflexionsfaktor Γ_{true} überein.

Um eine korrekte Messung durchführen zu können, müssen diese Fehler durch eine Kalibrierung kompensiert werden. Die Summe der systematischen Fehler lassen sich dabei in einem Fehlermodell mit S-Parameterdarstellung, wie in Bild 5.9 dargestellt, beschreiben [91].

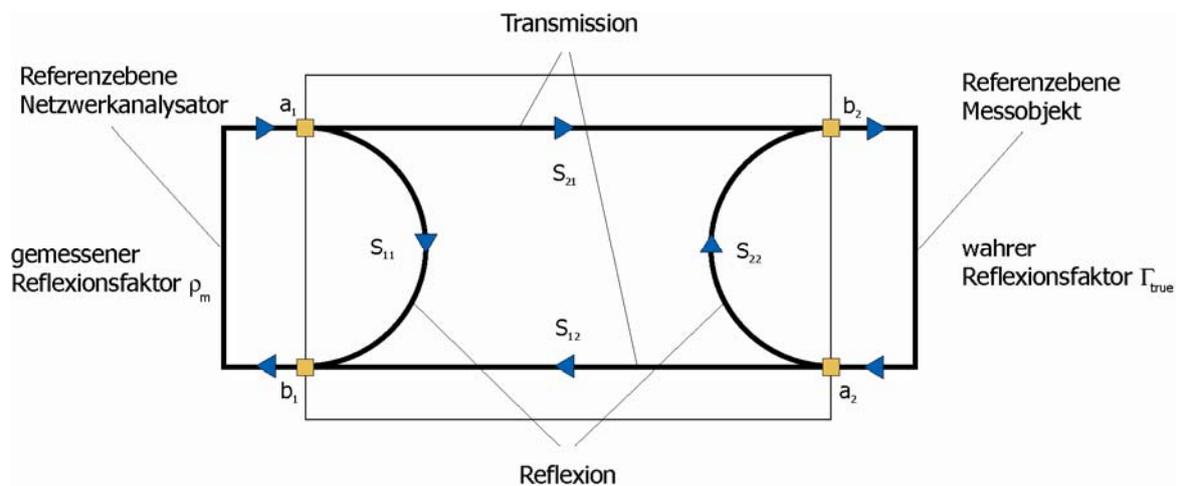


Bild 5.9: Darstellung des Fehlermodells des Messsystems durch S-Parameter [91]

In diesem Fehlermodell sind:

$$a_1 = \frac{E1_{\text{incd}}}{\sqrt{Z_0}} \quad (5.26)$$

$$b_1 = \frac{E1_{\text{refl}}}{\sqrt{Z_0}} \quad (5.27)$$

$$a_2 = \frac{E2_{\text{incd}}}{\sqrt{Z_0}} \quad (5.28)$$

$$b_2 = \frac{E2_{\text{refl}}}{\sqrt{Z_0}} \quad (5.29)$$

Hierbei sind $E1_{\text{incd}}$, $E2_{\text{incd}}$, $E1_{\text{refl}}$ und $E2_{\text{refl}}$ die elektrischen Spannungen der einfallenden bzw. reflektierten Welle am Tor 1 bzw. Tor 2 in [Volt] und Z_0 der Wellenwiderstand in [Ohm].

Dabei definieren sich die S-Parameter wie folgt:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (5.30)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (5.31)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad (5.32)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (5.33)$$

In S-Parameterdarstellung ergibt sich die folgende Beziehung zwischen ρ_m und Γ_{true} [55]:

$$\Gamma_{\text{true}} = \frac{\rho_m - S_{11}}{S_{22} \cdot \rho_m + S_{12} \cdot S_{21} - S_{11} \cdot S_{22}} \quad (5.34)$$

Die Richtschärfe S_{11} , die Quellenanpassung S_{22} und der Frequenzgangfehler $S_{12} \cdot S_{21}$ sind aus Messungen von drei Kalibrierstandards mit bekannten Reflexionsfaktoren Γ_1 , Γ_2 und Γ_3 wie folgt zu bestimmen:

$$S_{11} = \frac{\Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \rho_3 \cdot (\rho_1 - \rho_2) + \Gamma_1 \cdot \Gamma_3 \cdot \rho_2 \cdot (\rho_3 - \rho_1) + \Gamma_2 \cdot \Gamma_3 \cdot \rho_1 \cdot (\rho_2 - \rho_3)}{\Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot (\rho_1 - \rho_2) + \Gamma_1 \cdot \Gamma_3 \cdot (\rho_3 - \rho_1) + \Gamma_2 \cdot \Gamma_3 \cdot (\rho_2 - \rho_3)} \quad (5.35)$$

$$S_{22} = \frac{\Gamma_1 \cdot (\rho_2 - S_{11}) + \Gamma_2 \cdot (S_{11} - \rho_1)}{\Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot (\rho_2 - \rho_1)} \quad (5.36)$$

$$S_{12} \cdot S_{21} = \frac{(\rho_1 - S_{11}) \cdot (1 - S_{22} \cdot \Gamma_1)}{\Gamma_1} \quad (5.37)$$

Hierbei sind ρ_1 , ρ_2 und ρ_3 die gemessenen Reflexionsfaktoren der entsprechenden Kalibrierstandards (Open, Short und Load).

Gewöhnlich werden diese Fehlerterme durch eine OSL-Kalibration ermittelt [91]. Hierbei steht OSL für Kurzschluss, Leerlauf und angepasste Last (Open, Short and Load). Da die elektrotechnische Realisierung einer angepassten Last in einem breiten Frequenzbereich als Kalibrierstandard für diese Sensoren zu aufwendig ist, wurde die angepasste Last durch ein verlustloses Dielektrikum, in diesem Fall eine Präzisionskeramik aus reinem Aluminiumoxyd (Frialit-Degussit F99,7 der Firma FRIATEC AG), ersetzt.

Die Permittivitätszahl dieser Keramik wurde im Frequenzbereich 100 bis 500 MHz gemessen (vgl. Bild 5.10) und liegt im Bereich der Permittivitätszahl von Beton. Es hat sich herausgestellt, dass sich dieser Sachverhalt vorteilhaft auf die gewünschte Messgenauigkeit auswirkt.

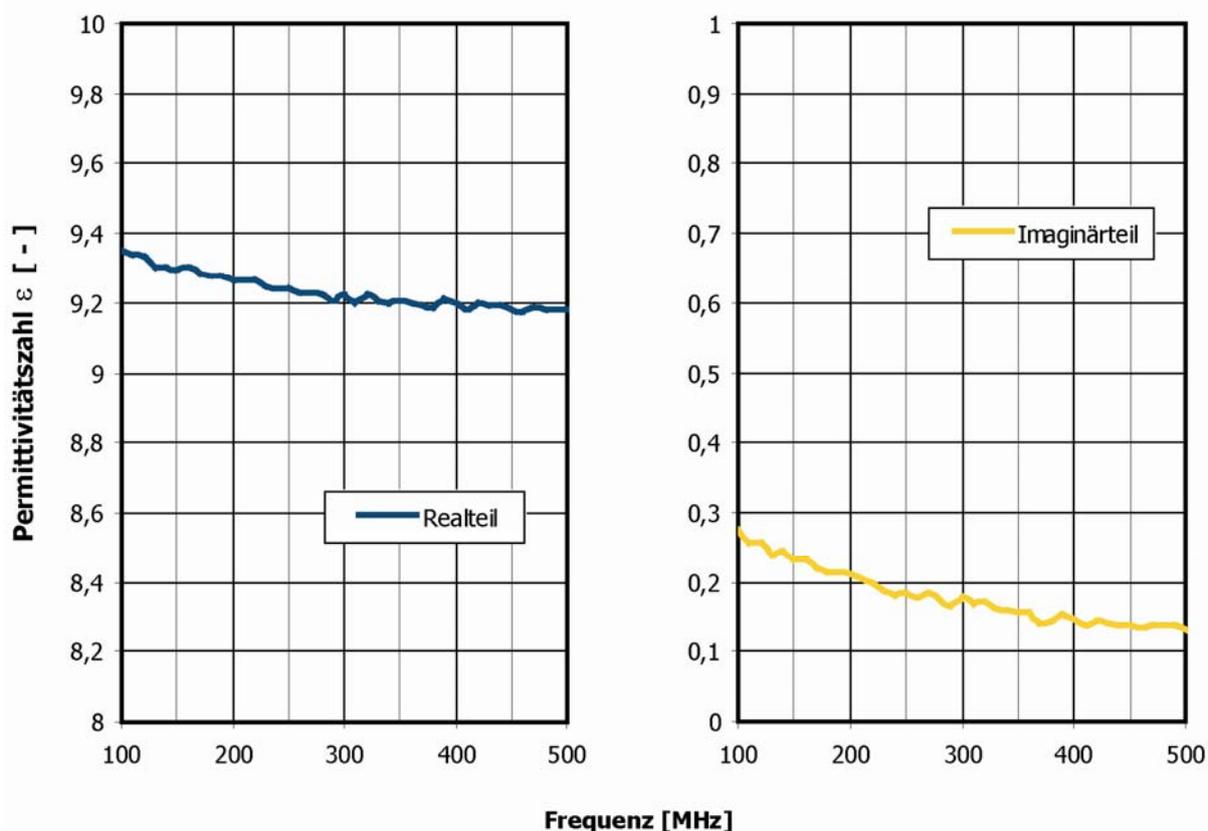


Bild 5.10: Real- und Imaginärteil der Präzisionskeramik als Funktion der Frequenz

Der Reflexionsfaktor des ersten Kalibrierstandards, des Kurzschlusses, lässt sich wie folgt darstellen:

$$\Gamma_1 = -1 \quad (5.38)$$

Beim Leerlauf- und Keramikstandard muss, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, die Streukapazität C_0 und der Leitwert G_R berücksichtigt werden. Nach Gleichung (5.5) ergeben sich für Luft ($\epsilon_a = 1 - j \cdot 0$) und für Keramik ϵ_k die folgenden Reflexionsfaktoren:

$$\Gamma_2 = \frac{1 - Z_0 \cdot [G_R + j \cdot \omega \cdot C_0]}{1 + Z_0 \cdot [G_R + j \cdot \omega \cdot C_0]} \quad (5.39)$$

$$\Gamma_3 = \frac{1 - Z_0 \cdot [(G_R + \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon_k'') + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon_k']}{1 + Z_0 \cdot [(G_R + \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon_k'') + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon_k']} \quad (5.40)$$

Mit diesen drei Kalibrierstandards kann nun eine Kalibration des Messsystems erfolgen. Man kann hier bereits erkennen, dass die Kalibrierprozedur eine Automatisierung mittels PC unumgänglich macht.

5.5 Berechnung der komplexen Permittivitätszahl

Mit dem vektoriellen Netzwerkanalysator wird der Reflexionsfaktor Γ_0 im Frequenzbereich von 100 bis 500 MHz gemessen. Er ist ein Vektor, der die Phasenverschiebung und die Dämpfung (Phase und Betrag) zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle beschreibt.

Die Streukapazität C_0 und der Leitwert G_R des Sensors ändern sich in Abhängigkeit von der Frequenz und in Abhängigkeit von den dielektrischen Eigenschaften des anliegenden Mediums. Aus diesem Grund wurden für jeden Sensor die Kapazität $C_0(f, \varepsilon', \varepsilon'')$ und der Leitwert $G_R(f, \varepsilon', \varepsilon'')$ für unterschiedliche Frequenzen und für unterschiedliche ε -Werte durch FEM-Berechnungen ermittelt und 3D-Matrizen $[(\varepsilon', \varepsilon'', C_0)$ und $(\varepsilon', \varepsilon'', G_R)]$ für jede Frequenz f (100 bis 500 MHz in 50 MHz Schritten) erstellt.

Der gemessene Reflexionsfaktor Γ_0 wird nun in Gleichung (5.6) eingesetzt. Dabei werden für C_0 und G_R zunächst die Anfangswerte $C_0(f, 1, 0)$ und $G_R(f, 1, 0)$ angenommen. Durch iterative Berechnungen wird eine Konvergenz erreicht und damit die komplexe Permittivitätszahl korrekt ermittelt.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Permittivitätszahl des anliegenden Mediums kann anhand des folgenden Beispiels erläutert werden:

Gesucht wird die Permittivitätszahl des anliegenden Mediums ($\varepsilon_m = a - j \cdot b$) bei einer Messfrequenz $f = 250$ MHz und einem gemessenen Reflexionsfaktor $\Gamma_0 = (-15^\circ, 0,9)$.

Die Anfangswerte $C_0(250, 1, 0)$ und $G_R(250, 1, 0)$ werden in Gleichung (5.6) eingesetzt, da die Permittivitätszahl des anliegenden Mediums nicht bekannt ist. Es wird ein erster Wert ε_m berechnet, z. B. $\varepsilon_m = 5 - j \cdot 1$. Nun werden in einem zweiten Schritt aus den Kalibrationsdaten des Sensors nach Abschnitt 5.3 die Werte $C_0(250, 5, 1)$ und $G_R(250, 5, 1)$ in Gleichung (5.6) eingesetzt. Dann wird wieder ein Wert für ε_m berechnet, z. B. $\varepsilon_m = 9,6 - j \cdot 4,4$. Diese Prozedur wird wiederholt bis eine Konvergenz erreicht und ein Endwert für ε_m berechnet wird, z. B. $\varepsilon_m = 11,2 - j \cdot 5,3$, wobei für das Konvergenzkriterium eine beliebige Genauigkeit gewählt werden kann.

5.6 Ermittlung des Wassergehalts

5.6.1 Integrale Messung mit einem Sensor

Die Ermittlung des Wassergehalts erfolgt durch Inversion der Mischungsregel nach Gleichung (3.33). Darunter versteht man die Bestimmung des Wassergehalts bei gegebener Permittivitätszahl des feuchten Materials. Dabei wird die Kenntnis der Materialparameter, zu denen die Permittivitätszahlen, die Depolarisationsfaktoren sowie die Volumenanteile der einzelnen Komponenten zählen, vorausgesetzt (vgl. Gleichung (3.33)). Ohne Kenntnis dieser Parameter ist es nicht möglich, aus einer Messung und bei einer Frequenz auf den Wassergehalt zu schließen.

Durch systematische Variation der Messfrequenz an ein und derselben Messstelle sowie durch die Bestimmung des Realteils und des Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl des feuchten Mediums erhält man zusätzliche Informationen über die Materialeigenschaften. Der wesentliche physikalische Grund hierfür besteht darin, dass im Bereich der angewendeten Messfrequenzen von 100 bis 500 MHz, trotz gleichen Feuchtegehalts des Betons, unterschiedliche Messsignale auftreten. Aus der Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften des Wassers in Abhängigkeit von der Frequenz, unter Anwendung der Mischungsregel von Polder-van Santen nach Gleichung (3.33), kann dann auf den Wassergehalt geschlossen werden.

Zur Ermittlung des Wassergehalts bei Beton werden nachfolgend der zugehörige Rechengang und die dabei getroffenen Annahmen erläutert.

Der Beton wird als ein vierkomponentiges Gemisch, bestehend aus der Feststoffphase, freiem (schwach gebundenem) Wasser, physikalisch gebundenem Wasser und Luft, betrachtet.

Die Wassermoleküle der ersten monomolekularen Schicht sind besonders fest gebunden und können sich im elektrischen Feld nicht orientieren. Ihr Beitrag zur Gesamtpolarisation wird daher zusammen mit dem chemisch gebundenen Wasser der Feststoffmatrix zugeordnet.

Die Wassermoleküle der zweiten bis hin zur achten Schicht werden als physikalisch gebunden betrachtet und können mit Hilfe der Debye-Theorie beschrieben werden [65]. Dabei wurden, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, Abschätzungen für das dielektrische Verhalten des physikalisch gebundenen Wassers vorgenommen. Demnach werden für die Cole-Cole-Parameter (siehe Gleichung (3.19)) des physikalisch gebundenen Wassers näherungsweise folgende Werte zugrunde gelegt. Die Temperatur T ist dabei in $^{\circ}\text{C}$ einzusetzen:

$$\tau_{\text{bw}} = -7,721 \cdot 10^{-14} T^3 + 1,017 \cdot 10^{-11} T^2 - 5,516 \cdot 10^{-10} T + 1,645 \cdot 10^{-8} \quad (5.41)$$

$$\varepsilon_{\infty(\text{bw})} = 4,5 \quad (5.42)$$

$$\varepsilon_{\text{s}(\text{bw})} = 80 \quad (5.43)$$

$$\kappa_{\text{bw}} = 0 \quad (5.44)$$

$$\alpha_{\text{bw}} = 0 \quad (5.45)$$

Die oben aufgeführten Parameter sind in Gleichung (3.19) definiert. Der Index (bw) steht dabei für physikalisch gebundenes Wasser (bound water).

Das restliche, nicht physikalisch gebundene Wasser im Bereich der größeren Kapillaren und Grobporen liegt, wie in Abschnitt 4.3.2 dargelegt, im Wesentlichen in Form von losem, sor-

biertem Wasser mit einer bestimmten Bindungsenergie vor. Da die beobachtete Relaxationsfrequenz dieses Wassers bei etwa 8 GHz und damit oberhalb des bei der Messung verwendeten Frequenzbereichs zwischen 100 MHz und 500 MHz liegt, können die Wassermoleküle diese Bindungsenergien bei solchen Frequenzen überwinden und verhalten sich somit wie freies Wasser. In diesem Zusammenhang wird das lose sorbierte Wasser näherungsweise als freies Wasser betrachtet und die dazugehörigen Cole-Cole-Parameter verwendet.

Da der Depolarisationsfaktor N (siehe Gleichung (3.33)) nur vom Axialquotient seiner Halbachsen abhängt, ist es möglich, bei einer Variation der Messfrequenz das Gleichungssystem nach dem Depolarisationsfaktor aufzulösen. Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass die Depolarisationsfaktoren der Einschließungen rotationssymmetrisch sind. Somit reduzieren sich die Depolarisationsfaktoren der einzelnen Komponenten von jeweils drei auf eine Unbekannte. Zusätzlich werden die Depolarisationsfaktoren des physikalisch gebundenen Wassers und der Luft als bekannt angenommen und betragen:

$$N_{bw} = 0 \quad (5.46)$$

$$N_a = 0 \quad (5.47)$$

Diese Annahme ist gerechtfertigt aufgrund des geringen Volumenanteils des physikalisch gebundenen Wassers und der Luft im Verhältnis zum Volumenanteil des freien Wassers, der somit einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Endergebnis hat.

Eine ähnliche Betrachtungsweise gilt auch für die elektrische Leitfähigkeit des Porenwassers κ_{fw} . Da feuchte Baustoffe meistens Salze in gelöster Form enthalten, muss deren Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit, insbesondere im Frequenzbereich 100 MHz bis 500 MHz berücksichtigt werden (vgl. Bild 3.6). Dies geschieht neben der Bestimmung des Realteils auch durch die Erfassung des Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl des Betons. Da die elektrische Leitfähigkeit κ_{fw} von der Messfrequenz unabhängig ist, lässt sich das Gleichungssystem neben dem Depolarisationsfaktor N_{fw} zusätzlich nach der elektrischen Leitfähigkeit κ_{fw} auflösen.

Die Permittivitätszahl der Feststoffphase des Betons im verwendeten Messbereich ist von der Frequenz unabhängig und wird aufgrund dessen vernachlässigbaren Einflusses vom Betonalter als unabhängig angenommen. Sie beträgt für die CEM I- und CEM III-Betone:

$$\varepsilon_{b(\text{CEM I})} = 6,00 \cdot \frac{M_z \cdot \rho_g}{M_z \cdot \rho_g + M_g \cdot \rho_z} + 4,5 \quad (5.48)$$

$$\varepsilon_{b(\text{CEM III})} = 5,15 \cdot \frac{M_z \cdot \rho_g}{M_z \cdot \rho_g + M_g \cdot \rho_z} + 4,5 \quad (5.49)$$

mit:

M_z, M_g Zement- bzw. Zuschlaggehalt in $[\text{kg}/\text{m}^3]$

ρ_z, ρ_g Zement- bzw. Zuschlagrohddichte in $[\text{g}/\text{cm}^3]$

Die Gleichungen (5.48) und (5.49) stammen aus systematischen Vergleichsmessungen an unterschiedlichen Betonmischungen mit unterschiedlichen Feuchtegehalten und trockenen Proben mit unterschiedlichen Zement- und Zuschlaggehalten sowie unterschiedlichen Zementarten. Sollten die Zementart und die Volumenverhältnisse unbekannt sein, so kann man für die Feststoffphase einen Wert von $\varepsilon'_b = 5,4$ annehmen. Der Imaginärteil ist vernachlässig-

bar gering und wird zu $\varepsilon''_b=0$ gesetzt. Generell ist hierbei zu beachten, dass sich in einer Betonprobe die Permittivitätszahl der Feststoffphase lokal ändern kann und sich somit die Annahme eines mittleren konstanten Wertes anbietet.

Der Volumenanteil des physikalisch gebundenen Wassers V_{bw} wird, aufgrund seines geringen Volumenanteils im Vergleich zum Volumenanteil des freien Wassers, von der Zementart, vom Zementgehalt, dem Wasserzementwert, dem Betonalter sowie dem Wassergehalt als unabhängig betrachtet. Es wird daher ein mittlerer konstanter Wert für V_{bw} bei allen Betonen angenommen. Wie sich bei der Auswertung der umfangreichen Messergebnisse (vgl. Abschnitt 6.3.2) an den unterschiedlichen Betonen zeigte, ergab sich für alle Betone ein durchschnittlicher Volumenanteil des physikalisch gebundenen Wassers von $V_{bw} = 1,6$ [Vol.-%].

Der Volumenanteil der Luft V_a kann bei einer realistischen Annahme einer mittleren Porosität bei Beton von etwa $\theta = 16$ Vol.-% und bei der Annahme eines durchschnittlichen Volumenanteils des physikalisch gebundenen Wassers von $V_{bw} = 1,6$ [Vol.-%] nach Gleichung (5.50) bestimmt werden:

$$V_{fw} + V_{bw} + V_a = \theta \quad (5.50)$$

Die Porosität der Betonproben wurde im Rahmen dieser Arbeit nach jeder dielektrischen Messung der Betonproben bestimmt (vgl. Abschnitt 6.3.1). Der nach Gleichung (5.50) errechnete Volumenanteil der Luft V_a wurde in die Berechnungen einbezogen.

Hinsichtlich des Fehlers, der bei der dielektrischen Wassergehaltsbestimmung auftritt, ist davon auszugehen, dass sich dieser erhöht, wenn anstelle veränderlicher Größen eine konstante Permittivitätszahl der Feststoffphase des Betons von 5,4, ein konstanter Wert für den Volumenanteil des physikalisch gebundenen Wassers von 1,6 Vol.-% und eine konstante Porosität von 16 Vol.-% in die Berechnungen eingehen. Werden dagegen die exakten Werte des zu untersuchenden Betons verwendet, so kann die Abweichung des ermittelten Wertes vom tatsächlich vorhandenem Wassergehalt ± 1 Vol.-% betragen. Das bedeutet, bei einem Gesamtwassergehalt von 16 Vol.-% einen Fehler von 6,25 %. Bei Verwendung der festen Größen steigt die Abweichung auf ± 2 Vol.-% an, welches einem Fehler von 12,5 % entspricht.

Zusammenfassend können folgende Parameter als bekannt betrachtet werden:

- Die dielektrischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten freies Wasser, physikalisch gebundenes Wasser und Luft: ε_{fw} , ε_{bw} , $\varepsilon_a = 1$, wobei ε_{fw} nach Gleichung (3.19) mit den Cole-Cole-Parametern nach Gleichungen (3.20) bis (3.28) und ε_{bw} nach Gleichung (3.19) mit den Cole-Cole-Parametern nach Gleichungen (5.41) bis (5.45) berechnet werden.
- Die Depolarisationsfaktoren des physikalisch gebundenen Wassers und der Luft: $N_{bw} = 0$, $N_a = 0$.
- Die Volumenanteile des physikalisch gebundenen Wassers und der Luft: $V_{bw} = 1,6$ Vol.-%, V_a nach Gleichung (5.50).

Die verbliebenen Unbekannten sind somit:

- Der gesuchte Volumenanteil des freien Wassers V_{fw}
- Der Depolarisationsfaktor des freien Wassers N_{fw}
- Die elektrische Leitfähigkeit des freien Wassers κ_{fw}

- Gemessen werden die Permittivitätszahlen des Mediums in Abhängigkeit der Frequenz: $\varepsilon_m(f_1), \varepsilon_m(f_2), \varepsilon_m(f_3), \dots$

Legt man nun der Auswertung der bei verschiedenen Frequenzen f ermittelten Messparameter (Real- und Imaginärteil der komplexen Permittivitätszahl) das theoretische Modell von Polder-van Santen entsprechend Gleichung (3.33) zugrunde, so ergibt sich daraus das folgende überbestimmte, nichtlineare Gleichungssystem (z. B. bei 9 Messfrequenzen, 9 Gleichungen), aus dem unter anderem der Wassergehalt des Betons V_{fw} errechnet werden kann:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_m(f_1) &= \varepsilon_b + \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{3} \cdot (\varepsilon_i(f_1) - \varepsilon_b) \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{\varepsilon_m(f_1)}{\varepsilon_m(f_1) + N_j \cdot (\varepsilon_i(f_1) - \varepsilon_m(f_1))} \\
 \varepsilon_m(f_2) &= \varepsilon_b + \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{3} \cdot (\varepsilon_i(f_2) - \varepsilon_b) \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{\varepsilon_m(f_2)}{\varepsilon_m(f_2) + N_j \cdot (\varepsilon_i(f_2) - \varepsilon_m(f_2))} \\
 \varepsilon_m(f_3) &= \varepsilon_b + \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{3} \cdot (\varepsilon_i(f_3) - \varepsilon_b) \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{\varepsilon_m(f_3)}{\varepsilon_m(f_3) + N_j \cdot (\varepsilon_i(f_3) - \varepsilon_m(f_3))} \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot
 \end{aligned} \tag{5.51}$$

Darin bedeuten:

- ε_m die Permittivitätszahl des feuchten Betons
- ε_b die Permittivitätszahl der Feststoffphase nach den Gleichungen (5.48) bzw. (5.49)
- ε_i die Permittivitätszahl der Einschließungen ($i=3$; freies Wasser, physikalisch gebundenes Wasser und Luft)
- f_1, f_2, f_3 unterschiedliche Messfrequenzen
- V_i die Volumenfraktionen der einzelnen Einschließungen (V_{fw}, V_{bw}, V_a)
- N_j der Depolarisationsfaktor eines Ellipsoids entlang seiner räumlichen Achsen ($j=3$)
- n die Anzahl der Einschließungen $n = 3$ (freies Wasser, physikalisch gebundenes Wasser und Luft) bei vierkomponentigen Gemischen

Die vorstehend genannte Vorgehensweise bei der Messung und Auswertung sowie bei der Interpretation der Messergebnisse stellt das Kernstück der Patentierung des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Messverfahrens dar [69].

Zur Auswertung der Messergebnisse und Berechnung der Unbekannten V_{fw} wurde die nichtlineare Methode der kleinsten Quadrate (nichtlineares Datenfitting), bei Anwendung des modifizierten Levenberg-Marquardt-Algorithmus, eingesetzt. Die Genauigkeit der Auswertung ist als gut einzustufen, da die gemessenen Reflexionsfaktoren $\Gamma_0(f_1)$ bis $\Gamma_0(f_9)$ im angewendeten Frequenzbereich stark variieren. Unvermeidlich ist ein relativ hoher Rechenaufwand. In Floating Point Operations (FLOPS) gemessen, sind etwa 200 000 FLPOS in MATLAB [63] für die Lösung der Gleichung (3.33) erforderlich.

5.6.2 Messungen mit vier Sensoren zur Bestimmung eines Feuchteprofils

Durch Austrocknung entsteht in einem Betonquerschnitt ein Feuchtegradient, dessen Verlauf sich durch die Befeuchtung und Trocknung infolge der jahres- und tageszeitlichen Feuchte- und Temperaturschwankungen ändert. Insbesondere die oberflächennahe Betonrandzone bis zu einer Dicke von etwa 30 mm ist einem ständigen Wechsel unterworfen. Hier treten starke Schwankungen auf und der Feuchtegradient kann sich komplett wandeln (außen feuchter als innen bzw. umgekehrt).

Die dielektrischen Messungen zur Ermittlung eines Feuchtegradienten wurden mit den vier Sensoren A, B, C und D mit dem Ziel vorgenommen, zerstörungsfrei ein vorhandenes Feuchteprofil durch die verschiedene Tiefenwirkung der Sensoren dielektrisch zu erfassen.

Da Einzelmessungen stets nur einen integralen Wert für den Feuchtegehalt liefern, waren theoretische Untersuchungen erforderlich, um einen Regressionsalgorithmus herleiten zu können, mit dessen Hilfe aus den gefundenen Einzelwerten auf Feuchteverteilungen zurückgerechnet werden kann.

Zur Modellierung einer monoton steigenden bzw. monoton fallenden Feuchteverteilung wurde eine Arcus-Tangens-Funktion mit drei variierbaren Parametern nach Gleichung (5.52) zugrunde gelegt:

$$w(z) = \alpha + \beta \cdot \arctan(\gamma \cdot z) \quad (5.52)$$

Darin bedeuten:

$w(z)$ der tiefenabhängige Wassergehalt in [Vol.-%]

z der Abstand von der Betonoberfläche [cm]

α, β, γ Regressionsparameter

Unter Berücksichtigung der nach Abschnitt 5.3.2 ermittelten spezifischen Eindringtiefen der Sensoren (vgl. Tabelle 5.2), können nun bei einer gegebenen Feuchteverteilung durch mindestens drei dielektrische Messungen mit drei verschiedenen Sensoren an ein und derselben Messstelle die drei Regressionsparameter der Arcus-Tangens-Funktion durch folgendes Gleichungssystem berechnet werden:

$$\begin{aligned} w_A &= \alpha + \beta \cdot \arctan(\gamma \cdot \bar{z}_A) \\ w_B &= \alpha + \beta \cdot \arctan(\gamma \cdot \bar{z}_B) \\ w_C &= \alpha + \beta \cdot \arctan(\gamma \cdot \bar{z}_C) \\ w_D &= \alpha + \beta \cdot \arctan(\gamma \cdot \bar{z}_D) \end{aligned} \quad (5.53)$$

Hierbei sind:

w_A, w_B, w_C und w_D die mit den Sensoren A, B, C und D, nach Abschnitt 5.6.1, ermittelten integralen Werte des volumetrischen Wassergehalts

$\bar{z}_A, \bar{z}_B, \bar{z}_C$ und \bar{z}_D die Schwerpunkte der Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes der Sensoren nach Tabelle 5.2

Die Genauigkeit der Lösung dieses Gleichungssystems (5.53) kann erhöht werden, indem eine zusätzliche Information einbezogen wird. Hierfür dient der Sensor A, mit dem aufgrund

seiner kleinen Abmessung und der dadurch resultierenden vernachlässigbaren Eindringtiefe der Wassergehalt w_A direkt an der Betonoberfläche ermittelt werden kann. Es gilt folglich:

$$w_A = \alpha \quad (5.54)$$

α Regressionsparameter in Gleichung (5.54), entspricht dem Wassergehalt im Oberflächenbereich

Aus der Lösung des überbestimmten Gleichungssystems (5.53) resultieren die Regressionsparameter α , β und γ , so dass damit eine monoton fallende bzw. steigende Feuchteverteilung im Betonquerschnitt dargestellt werden kann (vgl. Bild 5.11).

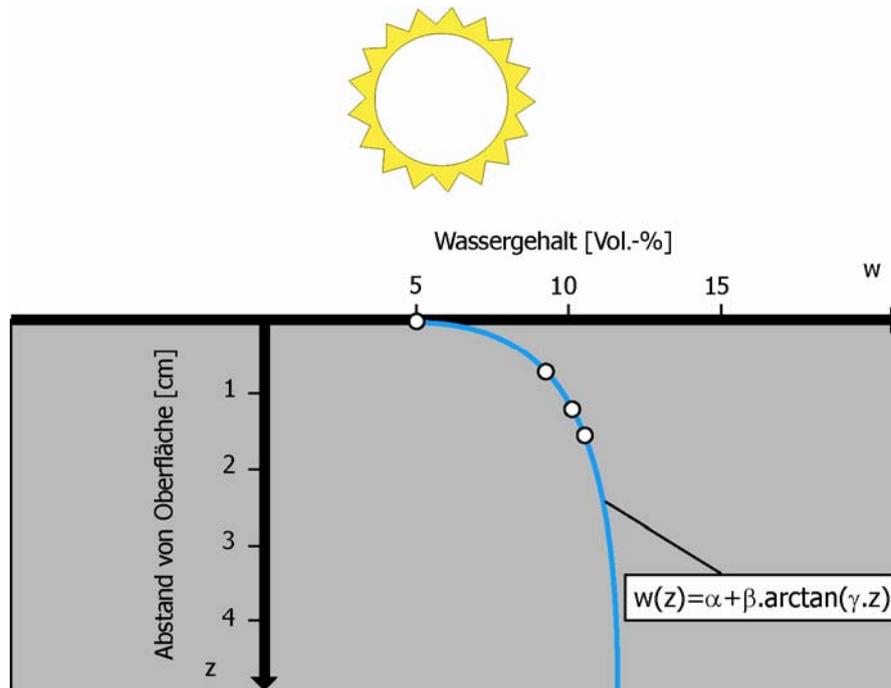


Bild 5.11: Schematische Darstellung einer monoton fallenden Feuchteverteilung im Betonquerschnitt nach Gleichung (5.53) am Beispiel einer konstanten Trocknung durch anhaltende Verdunstung über die Betonoberfläche

Des Weiteren wurde zur Modellierung beliebiger Feuchteverteilungen, wie sie bei einer intensiven Befeuchtung oder Trocknung, z. B. durch Gewitterregen bzw. starker Sonneneinstrahlung, auftreten können, folgende Funktion entwickelt, wobei für Beton $n = 1$ gesetzt werden kann:

$$w(z) = \frac{\alpha \cdot z + \beta}{\exp(z^n)} + \gamma \quad (5.55)$$

Aus der Lösung eines zu Gleichung (5.53) analogen Gleichungssystems resultieren bei Verwendung von Gleichung (5.55) dabei die Parameter α , β und γ . Mit Hilfe von Gleichung (5.55) kann die nicht monotone veränderliche Feuchteverteilung im Betonquerschnitt, z. B. außen feucht, darunter trocken und im Inneren feucht oder umgekehrt, dargestellt werden (vgl. Bild 5.12).

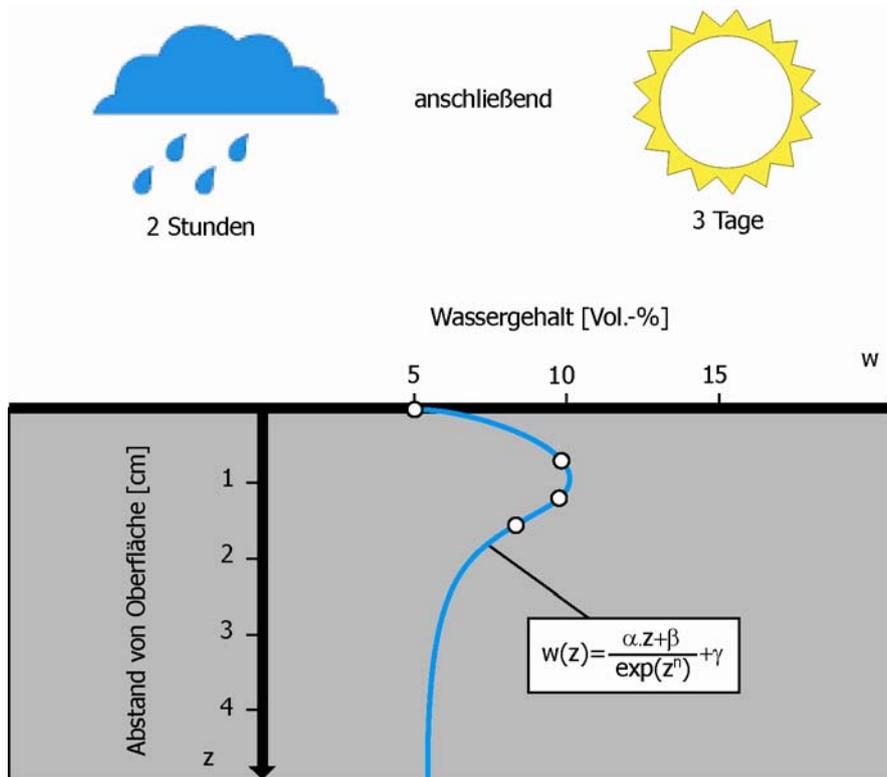


Bild 5.12: Schematische Darstellung einer beliebigen Feuchteverteilung im Betonquerschnitt nach Gleichung (5.56) am Beispiel einer intensiven Befeuchtung durch Gewitterregen und einer anschließenden starken Sonneneinstrahlung

6 Experimentelle Untersuchungen

6.1 Übersicht zum Untersuchungsprogramm

Die experimentellen Untersuchungen wurden an verschiedenen Betonen unter Verwendung eines CEM I- bzw. CEM III-Zements mit Wasserzementwerten von 0,45 und 0,65 und einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm durchgeführt. Eine Übersicht des Untersuchungsprogramms enthält Bild 6.1.

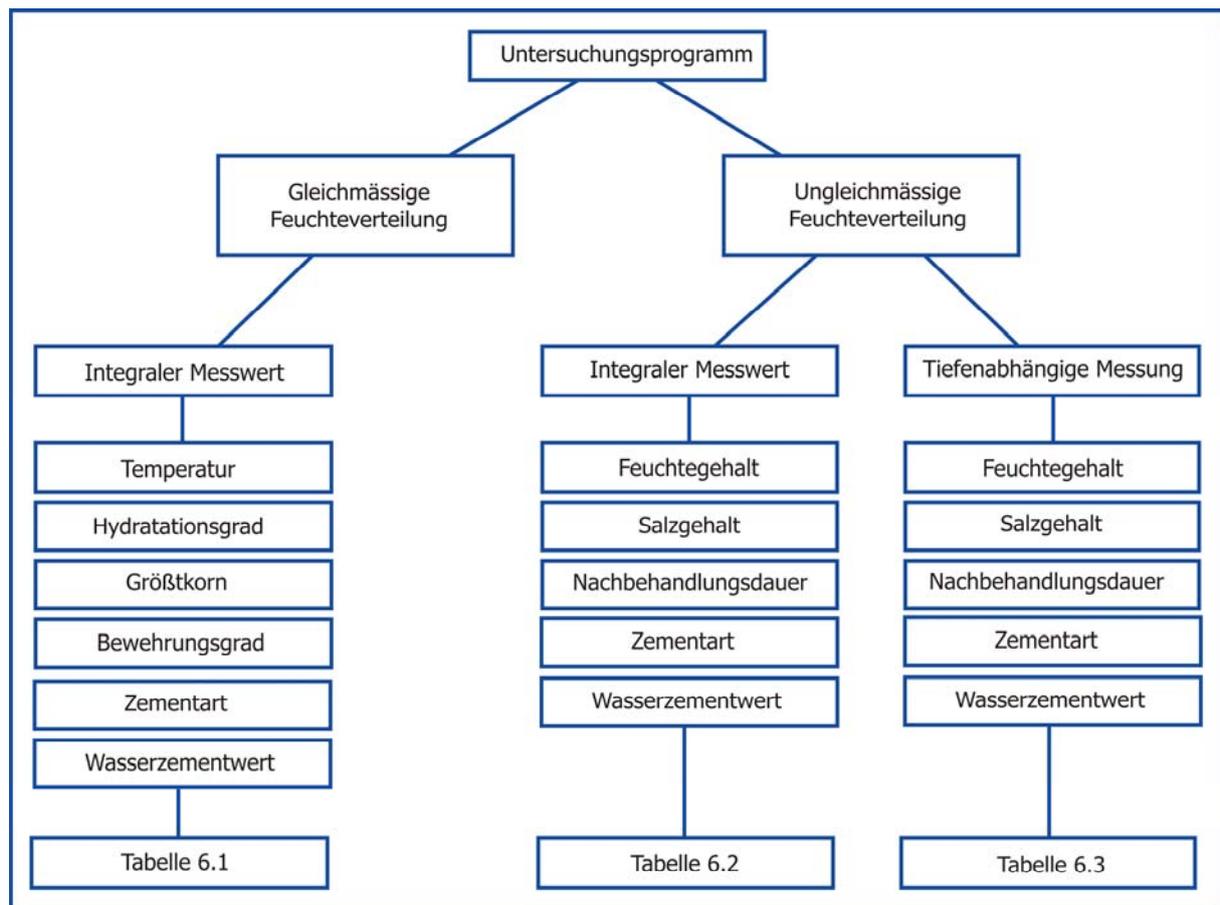


Bild 6.1: Übersicht zum Untersuchungsprogramm

Die Feuchtemessungen erfolgten neben dem dielektrischen Messverfahren zum Vergleich auch auf gravimetrischem Weg, d. h. durch Trocknung der Proben bei 105 °C, nach DIN

1048, Teil 1 [23]. Folgende Einflussfaktoren wurden untersucht: Temperatur, Hydratationsgrad, Größtkorn des Betons, Bewehrungsgrad, Feuchtegehalt, Salzgehalt und Nachbehandlungsdauer. Bei ausgewählten Prüfserien wurde mit unterschiedlichen Oberflächensensoren gemessen und damit, über die verschiedene Tiefenwirkung der Sensoren, zerstörungsfrei ein vorhandenes Feuchteprofil dielektrisch erfasst. Um den Einfluss der vielfältigen Parameter zu untersuchen war es notwendig unterschiedliche Lagerungsbedingungen und Feuchtebedingungen der Betonproben durchzuführen.

Unter gleichmäßiger Feuchteverteilung wird im Folgenden stets die Feuchteverteilung in versiegelt gelagerten Proben, die keine Feuchte an die Umgebung abgeben bzw. aus der Umgebung aufnehmen können, verstanden. Der Feuchtegehalt kann dementsprechend im gesamten Probenquerschnitt als konstant angenommen werden. Deshalb wurden die Messungen nur mit einem Sensor durchgeführt. Gemessen wurde hierbei, aufgrund der relativ kleinen Abmessungen der Prüfkörper, mit dem Sensor (B).

Konnten die Proben bei verschiedenen relativen Luftfeuchten austrocknen oder Wasser bzw. eine Salzlösung kapillar aufsaugen, wodurch sich im Probenquerschnitt ein Feuchtegradient einstellte, so wird im Folgenden von einer ungleichmäßigen Feuchteverteilung gesprochen (außen feuchter als innen bzw. umgekehrt). Hierbei wurde bei Proben, die keinen ausgeprägten Gradienten, aufgrund langer Lagerungsdauer, aufwies, ebenfalls nur mit einem Sensor (B) gemessen. Proben bei denen ein ausgeprägter Feuchtegradient zu erwarten war, wurden mit vier verschiedenen Sensoren gemessen, um das Tiefenprofil zu ermitteln.

Als Probekörper wurden Quader mit den Abmessungen 20 x 20 x 5 cm³ in Stahlschalungen stehend hergestellt. Für einige Einflussparameter wurden diese Quader durch sägen halbiert. Zusätzlich wurden Betonwürfel der Kantenlänge 20 cm sowie Betonplatten mit den Abmessungen 50 x 50 x 20 cm verwendet.

Eine Übersicht zum Untersuchungsprogramm, der Probenpräparation und der Versuchsdurchführung mit den verschiedenen Versuchskörpern ist in der Tabelle 6.1 bei gleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralem Messwert mit einem Sensor und in der Tabelle 6.2 bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung und integralem Messwert mit einem Sensor sowie in der Tabelle 6.3 bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung und integraler Messung mit vier Sensoren angegeben.

Tabelle 6.1: Übersicht zu Untersuchungs- und Einflussparameter bei gleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralem Messwert mit einem Sensor (Betonserien: siehe Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5)

Gleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor				
Untersuchungsparameter	Einflussparameter			
	Temperatur	Hydratationsgrad	Größtkorn	Bewehrungsgrad
Betonserie	A, C	B, D	E, F, G	H, J
Prüfalter [Tage]	28	1, 3, 7, 28, 90, 180	2, 5, 65	7, 28
Prüftemperatur [° C]	2, 10, 20, 35, 50	20	20	20
Probenabmessung [cm ³]	20×20×5	20×20×5	20×20×5	20×20×20
Lagerungsart	versiegelt	versiegelt	versiegelt	versiegelt
Lagerungstemperatur [° C]	20	20	20	20
Größtkorn des Betons [mm]	16	16	8, 16, 32	16
Bewehrungsgrad [%]	-	-	-	0,36; 0,8; 2,5
Sensor	B	B	B	D

Tabelle 6.2: Übersicht zu Untersuchungs- und Einflussparameter bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralen Messwert mit einem Sensor (Betonserien: siehe Tabelle 6.4)

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor				
Untersuchungsparameter	Einflussparameter			
	Feuchtegehalt	Salzgehalt		Nachbehandlungsdauer
		Feuchte Lagerung	Trockene Lagerung	
Betonserie	A, B, C, D	A, B, C, D	A, B, C, D	A, B, C, D
Prüfalter [Tage]	300	300	7, 28, 90	28, 90, 180
Prüftemperatur [° C]	20	20	20	20
Probenabmessung [cm ³]	20×10×5	20×10×5	20×10×5	20×20×5
Vorlagerung in NaCl-Lösung [g/l]	-	0; 60; 120	0; 60; 120	-
Trocknung in Klimakammer bei [% r. F.]	94, 75, 54, 33	94, 75, 54, 33	65	65
Lagerungstemperatur [° C]	20	20	20	20
Nachbehandlungsdauer [Tage]	7	7	7	1, 7
Größtkorn des Betons [mm]	16	16	16	16
Sensor	B	B	B	B

Tabelle 6.3: Übersicht zu Untersuchungs- und Einflussparameter bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren (Betonserien: siehe Tabelle 6.5)

Ungleichmäßige Feuchteverteilung und integraler Messung mit vier Sensoren			
Untersuchungsparameter	Einflussparameter		
	Feuchtegehalt	Salzgehalt	Nachbehandlungsdauer
Betonserie	I	H, I	H, I
Prüfalter [Tage]	28, 56	28	14, 28, 90
Prüftemperatur [° C]	-	20	20
Probenabmessung [cm ³]	50×50×20	20×20×20	20×20×20
Lagerungsart	5-Seitig versiegelt	5-Seitig versiegelt	5-Seitig versiegelt
Vorlagerung in NaCl-Lösung [g/l]	-	0; 60; 120	-
Lagerungstemperatur [° C]	-	20	20
Nachbehandlungsdauer [Tage]	7	7	1, 7
Größtkorn des Betons [mm]	16	16	16
Sensor	A, B, C, D	A, B, C, D	A, B, C, D

6.2 Eigenschaften der untersuchten Betone

6.2.1 Betonzusammensetzung

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden 10 verschiedene Betone unter Verwendung eines CEM I- (Firma Schwenk) bzw. CEM III-Zements (Firma Heidelberger Zement) und eines Rheinsandkiesgemischs als Zuschlag mit Wasserzementwerten von 0,45 und 0,65 und einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm ohne jegliche Zugabe von Zusatzmitteln oder Zusatzstoffen hergestellt. Bei der Herstellung der Betone wurde gewöhnliches Leitungswasser verwendet.

Bei der Erstellung des Versuchsprogramms wurde einerseits darauf geachtet, im Bereich der in der Praxis gebräuchlichen Betonzusammensetzungen zu bleiben, andererseits wurden die betontechnologischen Einflussparameter bis zu Ihren Grenzwerten variiert mit dem Ziel, Ihren Einfluss auf die dielektrische Messung zu untersuchen. Demzufolge wurde bei jeder Betonrezeptur systematisch immer nur ein Einflussparameter verändert. Eine Übersicht über die hergestellten Betone sowie deren Zusammensetzung ist in Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5 gegeben. Bei den Betonserien H, I und J wurden aus technischen Gründen im Gegensatz zu den übrigen Betonserien die Zuschlagsfraktionen 0/2 mm und 2/8 mm verwendet. Dieser Umstand hatte jedoch keinen relevanten Einfluss auf den Verlauf der Sieblinie gehabt.

Tabelle 6.4: Mischungszusammensetzung der untersuchten Betone A bis G

Serie	Zementart	w/z-Wert	Sieblinie	0/4 [kg/m ³]	4/8 [kg/m ³]	8/16 [kg/m ³]	16/32 [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	Zement [kg/m ³]
A	CEM I 32,5 R	0,45	B16	991,3	354,0	424,8	-	183,0	406,6
B	CEM I 32,5 R	0,65	B16	1042,5	372,3	446,8	-	181,7	279,5
C	CEM III/A 32,5	0,45	B16	981,7	350,6	420,7	-	183,0	406,6
D	CEM III/A 32,5	0,65	B16	1037,0	370,4	444,5	-	181,9	279,8
E	CEM I 32,5 R	0,65	B8	1298,0	464,3	-	-	209,9	323,0
F	CEM I 32,5 R	0,65	B16	991,2	354,0	424,5	-	208,0	320,0
G	CEM I 32,5 R	0,65	B32	865,3	263,2	385,7	263,2	206,1	317,1

Tabelle 6.5: Mischungszusammensetzung der untersuchten Betone H bis I

Serie	Zementart	w/z-Wert	Sieblinie	0/2 [kg/m ³]	2/8 [kg/m ³]	8/16 [kg/m ³]	16/32 [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	Zement [kg/m ³]
H	CEM I 32,5 R	0,45	B16	591,8	758,4	535,8	-	155,6	345,8
I	CEM I 32,5 R	0,65	B16	715,9	577,1	407,4	-	227,5	350,0
J	CEM III/A 32,5	0,45	B16	586,7	751,8	531,2	-	154,2	342,2

6.2.2 Frischbetoneigenschaften

Die an den Frischbetonen erzielten Frischbetonrohichten und Konsistenzklassen sind in Tabelle 6.6 aufgeführt. Dabei entsprach die Bestimmung der Frischbetoneigenschaften der DIN 1048, Teil 1 [23].

Tabelle 6.6: Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betonserien

Serie	w/z-Wert	Frischbetonrohddichte [g/cm ³]	Konsistenzklasse
A	0,45	2,35	KP
B	0,65	2,32	KP
C	0,45	2,34	KP
D	0,65	2,32	KP
E	0,65	2,30	KP
F	0,65	2,30	KP
G	0,65	2,30	KP
H	0,45	2,39	KP
I	0,65	2,27	KR
J	0,45	2,36	KP

Bemerkenswert war die relativ steife Konsistenz der Betone, die auf den verhältnismäßig hohen Anteil des Feinzuschlags sowie des Mehlkorngehalts des verwendeten Rheinsandkiesgemischs zurück zu führen ist.

6.2.3 Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen

Die Festbetoneigenschaften wurden im Alter von 28 Tagen bestimmt. Unter anderem wurden die Porosität, die Rohddichte und die Würfeldruckfestigkeit ermittelt. Die Ermittlung der Porosität und der Rohddichte wurde nach dem Wasseraufnahmeverfahren nach Abschnitt 6.3.1, an jeweils 2 bis 10 Proben bestimmt. Der Mittelwert sowie die Standardabweichung der beiden Größen sind in Tabelle 6.7 dargestellt. Die Lagerung und Durchführung der Prüfungen zur Bestimmung der Druckfestigkeit an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge entsprach der DIN 1048, Teil 5 [24] (siehe Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen

Serie	Porosität [Vol.-%]	Festbetonrohddichte [g/cm ³]	Mittlere Druckfestigkeit [N/mm ²]
A	15,12 ± 0,37	2,25 ± 0,012	48,0 ± 3,88
B	16,95 ± 0,22	2,20 ± 0,006	41,2 ± 1,79
C	16,45 ± 0,32	2,22 ± 0,010	53,0 ± 0,35
D	16,47 ± 0,51	2,22 ± 0,013	35,8 ± 0,77
E	17,83 ± 0,20	2,15 ± 0,005	39,5 ± 0,55
F	15,76 ± 0,01	2,23 ± 0,001	43,2 ± 0,81
G	15,54 ± 0,28	2,23 ± 0,007	46,6 ± 0,58
H	17,26 ± 0,76	2,23 ± 0,019	38,4 ± 0,16
I	15,79 ± 0,45	2,04 ± 0,011	52,3 ± 1,74
J	16,72 ± 0,20	2,21 ± 0,006	48,2 ± 0,53

6.3 Physikalische Laboruntersuchungen

6.3.1 Bestimmung der Porosität

Das gesamte offene Porenvolumen der Betone wurde mit dem Wasseraufnahmeverfahren nach DIN 52102 [30] nach jeder dielektrischen Messung bestimmt. Hierzu wurden die bei 105 °C getrocknete Bruchstücke der Proben der Masse m_{tr} zunächst unter Vakuum in Wasser getaucht. Anschließend verblieben die Proben für eine Dauer von 24 Stunden bei einem hydrostatischen Druck von 150 bar unter Wasser. Nach Wägung der nassen Probe m_{nass} und der getauchten Probe m_{tauch} kann die Porosität θ und die Rohdichte ρ_{roh} wie folgt berechnet werden:

$$\theta = \frac{m_{nass} - m_{tr}}{m_{nass} - m_{tauch}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

$$\rho_{roh} = \frac{m_{tr}}{m_{nass} - m_{tauch}} \quad (6.2)$$

In Bild 6.2 sind die gemessenen Gesamtporositäten (Mittelwerte aus 2 Einzelwerten) in Abhängigkeit vom Betonalter für die Betonserien B und D, dargestellt. Die Betonserien B und D dienen unter anderem dazu, den Einfluss des Hydratationsgrads zu untersuchen. Aus diesem Grunde wurden Messungen der Gesamtporosität am 1, 3, 7, 28, 90 und 180 Tag durchgeführt. Diese Bestimmungen der Porosität erfolgten nach jeder dielektrischen Messung, um die Wassergehaltsberechnung möglichst präzise vornehmen zu können (vgl. Abschnitt 5.6.1). Eine eindeutige Veränderung der Porosität mit zunehmendem Betonalter konnte dabei im Rahmen dieser Messungen nicht festgestellt werden.

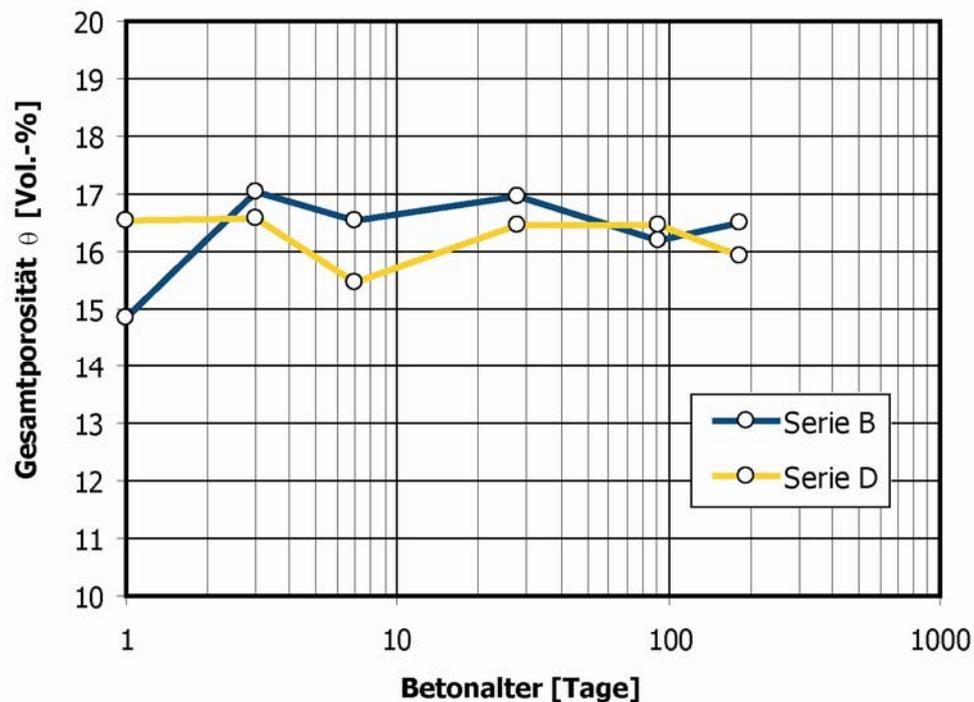


Bild 6.2: Gesamtporosität der Betonserien B und D in verschiedenen Altersstufen

6.3.2 Bestimmung der spezifischen Oberfläche

Als spezifische Oberfläche bezeichnet man die auf 1 g Substanz bezogene innere Porenwandoberfläche. Die Ermittlung der spezifischen Oberfläche der Betone erfolgte mittels Quecksilberdruckporosimetrie und Stickstoffadsorption an Betonproben, die zuvor im Ofen bei 105 °C getrocknet wurden. Zusätzlich wurden an Betonproben mit bekanntem Wassergehalt dielektrische Messungen durchgeführt, um auf den Anteil des physikalisch gebundenen Wassers rückzuschließen.

6.3.2.1 Quecksilberdruckporosimetrie

Neben der Bestimmung der Porosität und der Porengrößenverteilung kann mit der Quecksilberdruckporosimetrie auch die spezifische Oberfläche ermittelt werden. Hierbei wird Quecksilber, eine nicht benetzende Flüssigkeit, infolge eines von außen aufgetragenen Druckes bis in die Poren des Betons eingepresst. Setzt man voraus, dass die Poren des Betons eine zylindrische Form aufweisen, kann jedem Arbeitsdruck eine Porengröße zugeordnet werden.

Der Anwendung dieser Methode auf kleine Poren im Zementstein sind Grenzen gesetzt. Um z. B. Gelporen von 4 nm mit Quecksilber zu füllen, ist ein Druck von über 2000 bar notwendig. Gefügezerstörungen sind dabei nicht mehr auszuschließen. Ferner ist der Begriff Kontaktwinkel für eine Pore, deren Durchmesser nur wenige Moleküllagen beträgt, fragwürdig [5].

Die spezifische Oberfläche kann aus der Summenporenvolumenkurve der Quecksilberdruckporosimetrie berechnet werden, vorausgesetzt, dass das gesamte Porenvolumen des untersuchten Mediums erfasst wird [40]. Da Zementstein einen nicht zu vernachlässigen Anteil an Poren mit einem Radius $r < 4$ nm besitzt, bleiben diese Porenräume bei der Bestimmung der Oberfläche unberücksichtigt. Doch gerade kleine Porengeometrien können den größten Teil der inneren Porenwandoberfläche stellen.

Die Messungen erfolgten mit einem Quecksilberdruckporosimeter AutoPore III 9420 bei einer Oberflächenspannung des Quecksilbers von $\sigma_{\text{Hg}} = 0,485$ N/mm² und einem Kontaktwinkel zwischen Quecksilber und Feststoffoberfläche von $\delta_{\text{Hg}} = 141,3^\circ$. Die mittlere spezifische Oberfläche für alle Betone lag bei 4,32 m²/g, wobei keine nennenswerte Änderung der spezifischen Oberfläche in Abhängigkeit vom Betonalter, von der Zementart und vom Wasserzementwert zu verzeichnen war (vgl. Bild 6.3).

Tabelle 6.8: Messergebnisse der mit der Quecksilberdruckporosimeter ermittelten spezifischen Oberfläche

Betonserie	Spezifische Oberfläche [m ² /g]	Anzahl Einzelmessungen
A	3,34	24
B	3,67	22
C	4,09	24
D	4,22	22
E	3,43	2
F	3,74	2
G	6,46	2
H	5,66	2

In Tabelle 6.8 sind die Messergebnisse der mit der Quecksilberdruckporosimeter ermittelten spezifischen Oberfläche für die verschiedenen Betonserien dargestellt. Die Messergebnisse sind Mittelwerte von 2 bis 24 Einzelmessungen je Probekörper.

6.3.2.2 Gasadsorption

Eine Standardmethode zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche ist die Gasadsorption. Steht ein Gas mit einer Festkörperoberfläche im Gleichgewicht, so lagern sich je nach Partialdruck des Gases Moleküle an der Oberfläche des Feststoffes an, die aufgrund von Van-der-Waalschen Kräften adsorbiert werden.

Nach der Theorie von Brunauer, Emmet und Teller (BET) [14] lässt sich im relativen Partialdruckbereich von etwa 0 bis 30 % ein so genanntes Monolayervolumen V_m aus der Isotherme berechnen.

Das Monolayervolumen ist das Gasvolumen, das benötigt wird, um eine monomolekulare Schicht auf der Festkörperoberfläche aufzubauen. Bei Kenntnis der Molekülgröße des Adsorbats lässt sich, durch Geometrieüberlegungen, die spezifische Oberfläche berechnen.

Die Untersuchungen an den zuvor im Ofen bei 105 °C getrockneten Betonproben wurden mit Stickstoff als Adsorbat bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs durchgeführt. Die Sorption spielt sich dabei hauptsächlich in Poren mit einem Durchmesser < 30 nm ab und erschließt somit den von der Quecksilberdruckporosimetrie nicht erfassten Porengrößenbereich.

Die Ergebnisse der Stickstoffadsorptionsmessungen ergaben im Mittel für alle Betone eine BET-Oberfläche von 2,80 m²/g. Wie bei der Quecksilberdruckporosimetrie konnte auch hier keine nennenswerte Änderung der spezifischen Oberfläche in Abhängigkeit vom Betonalter, von der Zementart und vom Wasserzementwert festgestellt werden.

In Tabelle 6.9 sind die Messergebnisse der mit der Stickstoffadsorption ermittelten spezifischen Oberfläche für die Betonserien B und D dargestellt. Die Messergebnisse sind Mittelwerte von 6 Einzelmessungen je Probekörper.

Tabelle 6.9: Messergebnisse der mit der Stickstoffadsorption ermittelten spezifischen Oberfläche

Betonserie	Spezifische Oberfläche [m ² /g]	Anzahl Einzelmessungen
B	2,73	6
D	2,88	6

In Bild 6.3 sind die aus der Summenporenvolumenkurve der Quecksilberdruckporosimetrie berechneten spezifischen Oberflächen (HG) den mit der Stickstoffadsorption gemessenen Oberflächen (BET) für die Betonserien B und D im Alter von 1, 3 und 7 Tagen gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Quecksilberdruckporosimetrie größere Werte als die Sorptionsmessung liefert. Die Ursache hierfür kann einerseits auf den Effekt zurück geführt werden, dass größere Poren bei der Quecksilberdruckporosimetrie über kleinere Poren erschlossen werden, die bei der Auswertung gegenüber der tatsächlichen Situation zu einem größeren Volumenanteil der kleineren Porenräume führt. Aufgrund des kleineren Radius nimmt bei gleichem Volumen die spezifische Oberfläche im Vergleich zu größeren Poren zu. Andererseits sind die spezifischen Oberflächen der untersuchten Betone im unteren Grenzbereich der verwendeten Sorptionsmesseinrichtung.

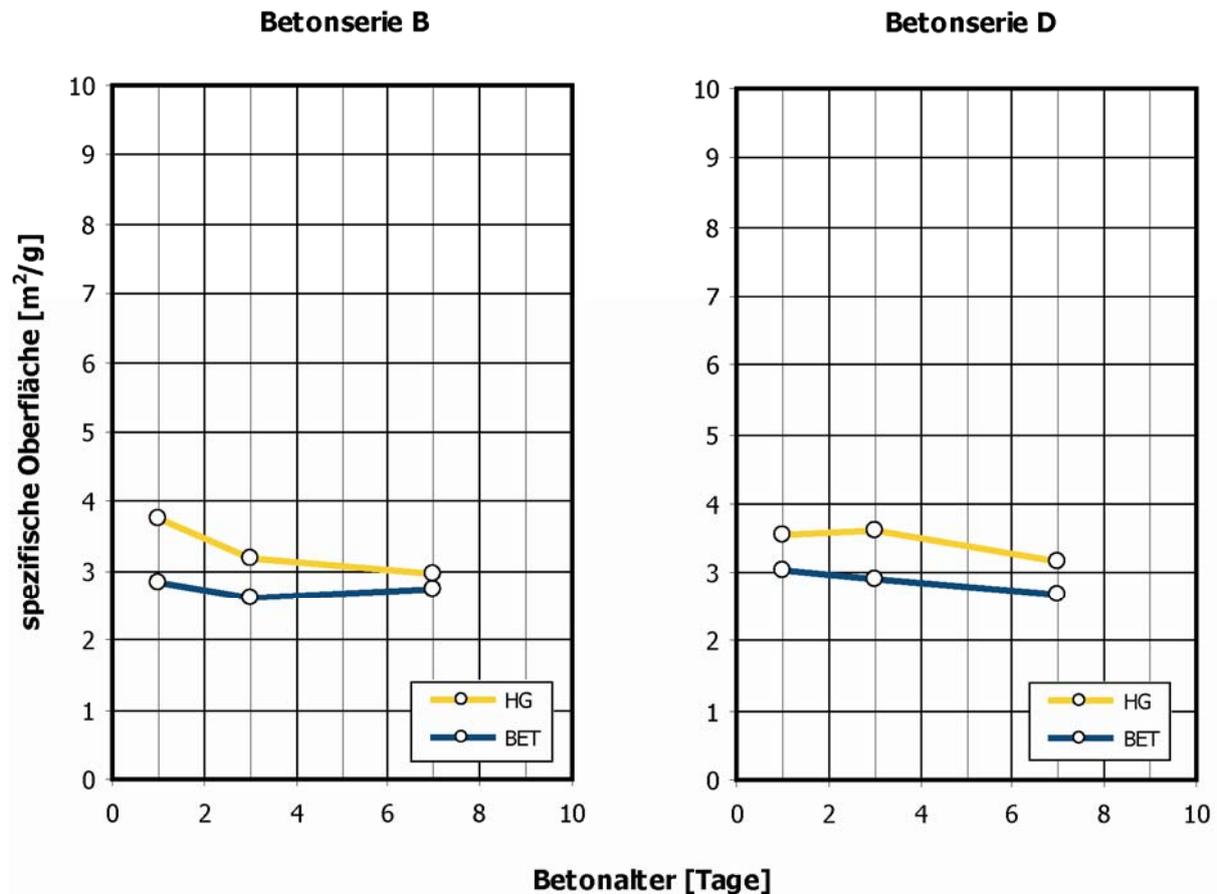


Bild 6.3: Aus der Summenporenvolumenkurve (HG) berechnete und mit der Stickstoffadsorption (BET) gemessene spezifische Oberflächen für die Betonserien B und D im Alter von 1, 3 und 7 Tagen

6.3.2.3 Dielektrische Messung

Des Weiteren wurde durch dielektrische Messungen an Proben mit bekanntem Wassergehalt, auf der Basis des Gleichungssystems (5.51), auf den Anteil des physikalisch gebundenen Wassers rückgeschlossen. Hierbei wurde der gravimetrisch ermittelte Wassergehalt, also $V_{fw} + V_{bw}$, in das oben genannte Gleichungssystem als bekannt eingesetzt. Hierdurch konnte für alle gemessenen Betone eine durchschnittliche Menge an physikalisch gebundenem Wasser von 1,6 Vol.-% ermittelt werden. Eine nennenswerte Abhängigkeit des berechneten Anteils des physikalisch gebundenen Wassers vom Betonalter, von der Zementart und vom Wasserzementwert konnte mit dieser Methode nicht festgestellt werden

Nimmt man nun an, dass der dielektrische Einflussbereich der Oberflächenbindungsenergie 7 Wasserschichten weit reicht [73], gilt für eine monomolekulare Schicht ein Wert für das Monolayervolumen von $V_m = \frac{1,6}{7} = 0,229$ Vol.-%. Aus dem Monolayervolumen V_m kann die spezifische Oberfläche S nach folgender Gleichung ermittelt werden [5]:

$$S = \frac{V_m}{M} \cdot N \cdot A_m \cdot 10^{-20} \quad (6.3)$$

Darin bedeuten:

M Molekulargewicht des Wassers ($M=18$ [g.mol⁻¹])

N Avogadrozahl ($N=6,0221415 \cdot 10^{23}$ [mol⁻¹])

A_m Platzbedarf pro Molekül in [Å²]

Der Platzbedarf pro Molekül kann aus Geometrieüberlegungen abgeleitet werden und beträgt für Wasser 11,4 Å² [5]. Man erhält auf diesem Wege eine spezifische Oberfläche von $S = 8,73$ m²/g.

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden: Die ermittelten spezifischen Oberflächen mit der Quecksilberdruckporosimetrie sowie der Stickstoffadsorption lagen bei etwa 4,32 m²/g bzw. 2,80 m²/g. Während die berechnete spezifische Oberfläche auf dielektrischem Wege einen Wert von 8,73 m²/g ergab.

Sowohl für die Quecksilberdruckporosimetrie als auch für die Stickstoffadsorption ist allerdings anzumerken, dass die notwendige Ofentrocknung der Proben bei 105 °C eine Veränderung der inneren Struktur bewirkt. So ist z. B. das Ettringit im Zementstein nur bis 70 °C beständig. Ein schonenderes aber zeitaufwendigeres Verfahren ist dagegen die Gefriertrocknung unter Vakuum, bei der die Trocknung unter Umgehung des flüssigen Aggregatzustandes, d. h. durch direkte Überführung von Eis zu Dampf, erfolgt. Der Einfluss der unterschiedlichen Trocknungsmethoden wurde in ([11], [100], [58]) an Zementstein untersucht. Dabei ergaben sich für die spezifische Oberfläche bei Gefriertrocknung im Vergleich zu Ofentrocknung 3-fach höhere Werte. Demzufolge muss die spezifische Oberfläche der untersuchten Betone weit über den Werten liegen, die mit den zwei unterschiedlichen Verfahren ermittelt wurden.

Aus diesem Grund wurde der auf dielektrischem Wege berechnete Mittelwert der spezifischen Oberfläche mit dem Wert von 8,73 m²/g als eher wahrscheinlich erachtet. Das Volumen des physikalisch gebundenen Wassers von 1,6 Vol.-%, das dieser spezifischen Oberfläche entspricht, wurde als konstante Größe V_{bw} in die Berechnungen einbezogen (vgl. Abschnitt 5.6.1).

6.4 Probenpräparation und Versuchsdurchführung

6.4.1 Untersuchungsparameter bei gleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor

Die Untersuchungsparameter bei gleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor umfassten die Temperatur, den Hydratationsgrad, das Größtkorn an quaderförmigen Proben mit Probenabmessungen von 20 x 20 x 5 cm³ sowie den Bewehrungsgrad an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 20 cm. Alle Proben waren bis zum Prüftermin mit einer PE-Folie versiegelt. Die dielektrische Messung erfolgte für die ersten 3 Untersuchungsparameter mit dem Sensor B. Zur Untersuchung des Einflusses des Bewehrungsgrades wurde der Sensor D eingesetzt (vgl. Tabelle 6.1).

Die Untersuchungen wurden an Betonproben durchgeführt, die so betoniert wurden, dass die Flächen, an denen später die dielektrischen Messungen erfolgten, an einer vertikalen Stahlschalung anlagen. Eine glatte Oberfläche der Betonprüfkörper ist eine wesentliche Voraussetzung für die luftspaltfreie Ankopplung der Sensoren.

Die Versuchskörper wurden unmittelbar nach dem Entschalen, 1 Tag nach Herstellung, in einer PE-Folie luftdicht versiegelt und bis zum Prüftermin bei 20 °C gelagert. Dabei wurde davon ausgegangen, dass eine gleichmäßige Feuchteverteilung über den Betonquerschnitt vorliegt. Die dielektrischen Messungen wurden an den glatten Grund- und Deckflächen der qua-

derförmigen Versuchskörper durchgeführt. Um der Heterogenität des Baustoffs Beton Rechnung zu tragen, wurden 12 dielektrische Messungen an verschiedenen Stellen der Probe (6 Messungen auf jeder Seite, vgl. Bild 6.4) durchgeführt. Die dielektrisch ermittelten Wassergehalte stellen somit Mittelwerte aus 12 Einzelmessungen je Betonprobe dar. Nach den Messungen wurden die Proben gewogen und im Ofen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (gravimetrische Wassergehaltsbestimmung).

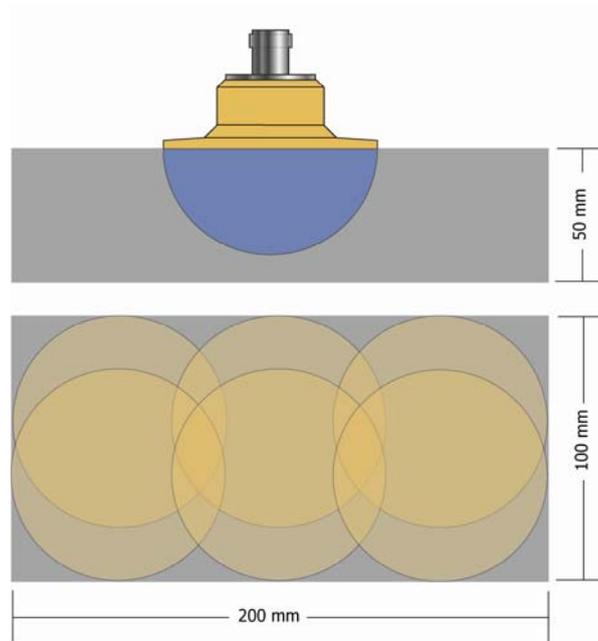


Bild 6.4: Schematische Darstellung der quaderförmigen Betonprobe am Beispiel einer Probe mit den Abmessungen 20 x 10 x 5 cm³. Im oberen Teil der Skizze ist eine Seitenansicht mit dem Sensor B zusehen. Im unteren Teil ist eine Draufsicht mit 6 Messstellen dargestellt

6.4.1.1 Einfluss der Temperatur

Die dielektrischen Messungen bei Betontemperaturen von 2, 10, 20, 35 und 50 °C erfolgten in einer Plexiglasbox, die an eine Temperieranlage angeschlossen war (vgl. Bild 6.5). Die Plexiglasbox wurde an beiden Seiten mit Aluminiumrohren (In Bild 6.5 nicht zu sehen) mit der Temperieranlage verbunden, so dass die temperierte Luft durch die Plexiglasbox strömen konnte. Durch eine Öffnung an der hinteren Seite der Plexiglasbox war es möglich, Betonproben hinein zu stellen bzw. heraus zu nehmen. Zusätzlich befand sich auf der oberen Seite der Box eine kleine runde Öffnung für den Sensor.

Im Betonalter von 28 Tagen wurden die Proben mit den Abmessungen 20 x 20 x 5 cm³ der Betonserien A und C im versiegelten Zustand in der Plexiglasbox auf die gewünschte Mess-temperatur gebracht. Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt zu gewährleisten, wurden im Inneren und an der Oberfläche einer Parallelprobe, die sich ebenfalls in der Plexiglasbox befand, Temperaturfühler einbetoniert. Die Temperierung dauerte so lange an, bis kein Unterschied zwischen der gemessenen Innen- und Außentemperatur der Parallelprobe festzustellen war.

Das Entfernen der Versiegelung sowie die dielektrischen Messungen an den Proben erfolgten von außen über Greifhandschuhe, die in die Plexiglasbox eingearbeitet waren (Inkubator).

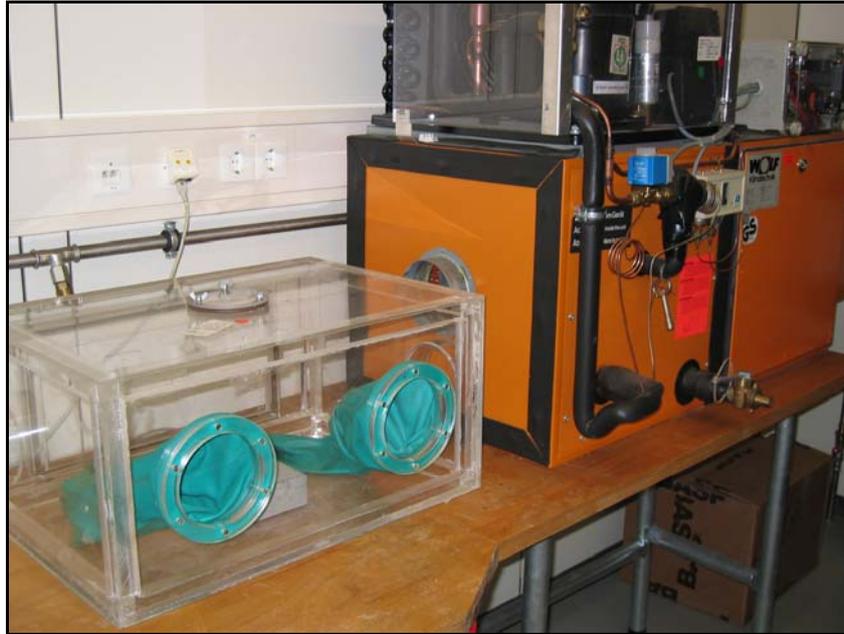


Bild 6.5: Messeinrichtung zur Untersuchung des Temperatureinflusses bestehend aus einer Plexiglasbox mit Greifhandschuhen (links) und einer Temperieranlage (rechts)

6.4.1.2 Einfluss des Hydratationsgrads

Um den Einfluss des Hydratationsgrads des Zements und die damit verbundenen Strukturänderungen des Betons, insbesondere hinsichtlich der Ionenkonzentration der Porenlösung und des Wassergehalts zu untersuchen, wurden die dielektrischen Messungen an den Betonserien B und D mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,65$ im Betonalter von 1, 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen bei 20 °C an Probekörpern mit den Abmessungen $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$ durchgeführt.

6.4.1.3 Einfluss des Größtkorns des Betons

Für die Analysen zum Einfluss der Korngröße wurden die drei Betone E, F und G mit Größtkornabmessungen von 8, 16 und 32 mm hergestellt. Der Wasserzementwert betrug dabei einheitlich $w/z = 0,65$ und der Zementgehalt (CEM I) der Betone 320 kg/m^3 . Die dielektrischen Messungen erfolgten an den Versuchskörpern mit den Abmessungen $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$ im Betonalter von 2, 5 und 65 Tagen bei 20 °C.

6.4.1.4 Einfluss des Bewehrungsgrads

Es war nicht beabsichtigt, im Rahmen dieser Arbeit den Einfluss des Bewehrungsgrads auf das Messsignal systematisch und quantitativ zu erfassen. Anhand von exemplarischen Versuchen sollte jedoch geprüft werden, ob und ab welcher Größenordnung die Bewehrung einen Einfluss auf die Messergebnisse ausübt. Dazu wurde an zwei verschiedenen Betonen (Serien H und J), unter Berücksichtigung von drei geometrischen Bewehrungsgraden (0,36; 0,8 und 2,5 %) und einer üblichen Betondeckung von 3 cm, Messungen vorgenommen. Als Vergleich dienten entsprechende Probekörper ohne Bewehrung.

Entsprechend der genannten Bewehrungsgrade wurden Bewehrungsmatten mit unterschiedlichen Stabdurchmessern und Stababständen hergestellt und in würfelförmigen Schalungen mit einer Kantenlänge von 20 cm in einem Abstand vom Schalungsboden von 3 cm einbetoniert. In Bild 6.6 ist eine Bewehrungsmatte mit einem geometrischen Bewehrungsgrad von 0,36 % längs der horizontalen Achse exemplarisch dargestellt.

Die dielektrischen Messungen wurden an den würfelförmigen Probekörper mit der Kantenlänge von 20 cm im Betonalter von 7 und 28 Tagen bei 20 °C durchgeführt. Bis zum Prüftermin wurden die Proben im versiegelten Zustand bei 20 °C gelagert. Um höhere Eindringtiefen zu erreichen, erfolgten die dielektrischen Messungen mittels des Sensors D. Aufgrund der Größe des Sensors D im Verhältnis zum Probenquerschnitt konnten hierbei keine dielektrischen Messungen an verschiedenen Stellen durchgeführt werden, sondern nur eine Messung und zwar mittig zentriert zum Probenquerschnitt.

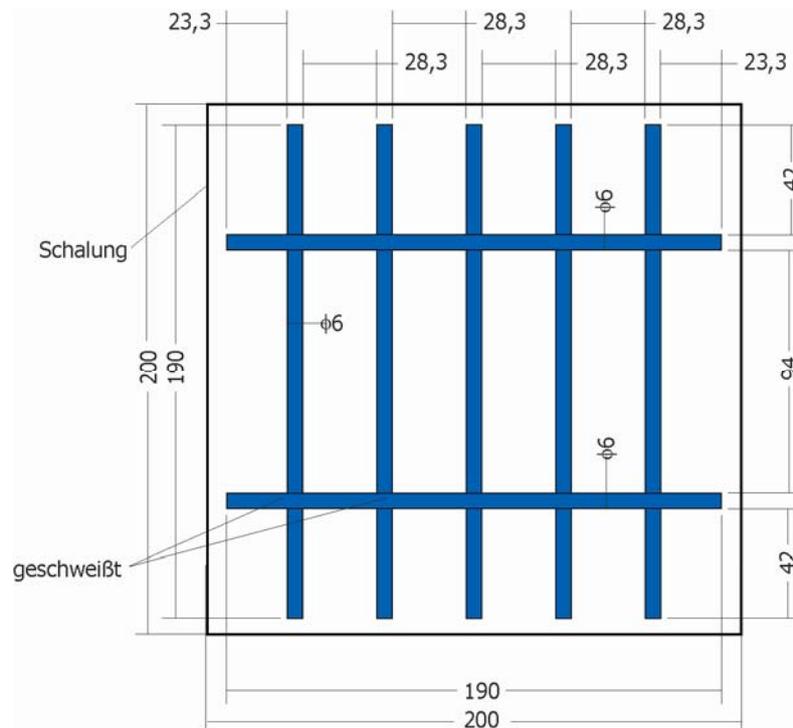


Bild 6.6: Bewehrungsmatte (Draufsicht) mit einem geometrischen Bewehrungsgrad längs der horizontalen Achse von 0,36 % (Abmessungen in mm)

6.4.2 Untersuchungsparameter bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor

6.4.2.1 Einfluss des Feuchtegehalts

Im Zuge dieser Arbeit wurde angestrebt, das in der Baupraxis vorkommende Feuchtegehaltsspektrum abzudecken. Dazu war eine Feuchteconditionierung der Betonproben erforderlich. Hierfür wurden die Versuchskörper der Betonserien A, B, C und D mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ im Anschluss an einer 7-tägigen Feuchtlagerung in luftdicht verschlossene Klimakammern (siehe Bild 6.7) mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und einer konstanten Temperatur von 20 °C eingelagert und im Alter von 300 Tagen gemessen. Die konstanten relativen Luftfeuchten in den Klimakammern von 33 %, 54 %, 75 % und 94 % wurden mittels gesättigter Salzlösungen nach DIN 50008 Teil 1 [29] eingestellt. Dabei wurden die Prüfkörper auf luftdurchlässigen Einlegeböden mit ausreichendem Abstand (ca. 20 cm) zueinander angeordnet. In den Klimakammern befanden sich zwei Lüfter, die für eine ständige Luftumwälzung sorgten.

Zur Klärung der Frage, welche Feuchteverteilung sich über den Betonquerschnitt im Versuchszeitraum von etwa 300 Tagen einstellt, wurde der Trocknungsverlauf des Betons auch numerisch simuliert. Für die Berechnung der Feuchteverteilung wurde das Finite-Elemente-Programm ADINA-T eingesetzt [3].



Bild 6.7: Vier übereinander liegende Klimakammern mit konstanten relativen Luftfeuchten von 33 %, 54 %, 75 % und 94 % und einer konstanten Temperatur von 20 °C

Der für die Berechnung benötigte nichtlineare Diffusionskoeffizient kann nach dem CEB-FIP Model Code 1990 [16] für isotherme Verhältnisse als Funktion der relativen Porenfeuchte nach Gleichung (6.4) beschrieben werden:

$$D(H) = D_1 \cdot \left[\alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + \left[\frac{(1 - H)}{(1 - H_c)} \right]^n} \right] \quad (6.4)$$

mit:

$$\alpha = \frac{D_0}{D_1} \quad (6.5)$$

Darin bedeuten:

D_0 Minimalwert des Diffusionskoeffizient $D(H)$ für $H = 0 \text{ m}^2/\text{s}$

D_1 Maximalwert des Diffusionskoeffizient $D(H)$ für $H = 1 \text{ m}^2/\text{s}$

H_c Relative Porenfeuchte bei $D(H) = 0,5 \cdot D_1$

n Exponent

H Relative Porenfeuchte

Hierbei wurden für Beton folgenden Näherungswerte angenommen [8] und [9]:

$$\alpha = 0,05; H_c = 0,80; n = 15$$

D_1 kann nach Gleichung (6.6) abgeschätzt werden:

$$D_1 = \frac{D_{1,0}}{f_{ck} / f_{ck0}} \quad (6.6)$$

mit:

$$D_{1,0} \quad 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$f_{ck0} \quad 10 \text{ N/mm}^2$$

f_{ck} Nennfestigkeit des Betons, ermittelt am Zylinder [N/mm²]

Für die konvektiven Randbedingungen wurde eine Feuchtübergangszahl $H_F = 5 \text{ mm}^2/\text{Tag}$ nach Alvaredo [2] angesetzt.

Bild 6.8 zeigt exemplarisch die rechnerisch ermittelten Feuchteverteilungen in einer Betonplatte mit einer Dicke von 50 mm und einer Nennfestigkeit f_{ck} von 30 N/mm², die beidseitig austrocknen kann, nach unterschiedlicher Trocknungsdauer. Auf der Ordinate ist das Feuchtepotential Φ nach Kiehl [54] aufgetragen, wobei angenommen wurde, dass die innere Ausgangsfeuchte des Betons 100 % r. F. und die Umgebungsfeuchte 50 % r. F. beträgt.

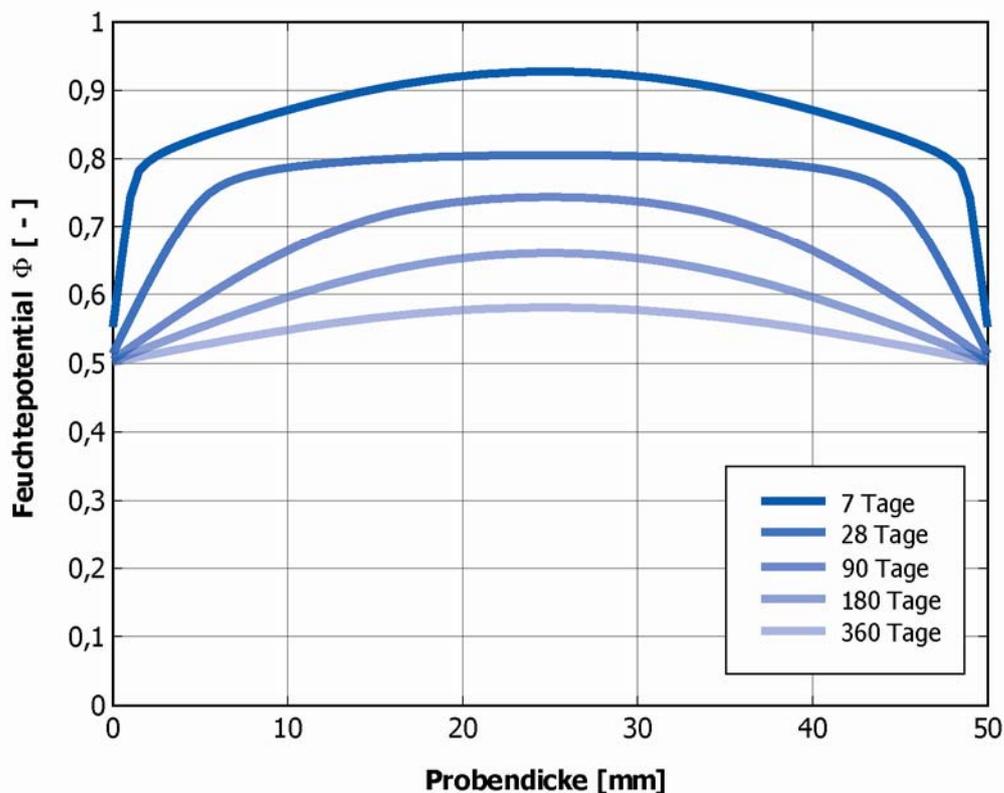


Bild 6.8: Rechnerische Feuchteverteilungen über den nach beiden Seiten austrocknenden Querschnitt mit einer Probendicke von 50 mm zu verschiedenen Zeitpunkten nach Austrocknungsbeginn

Anhand der numerischen Berechnungen, welche in guter Übereinstimmung mit den durchgeführten Berechnungen von Maliha [62] stehen, ist festzustellen, dass der Trocknungsprozess im Beton, wie im Bild 6.8 für eine 50 mm dicke Betonplatte dargestellt, äußerst langsam ver-

läuft. Folglich ist auch bei einer Einlagerungsdauer von 300 Tagen keine gleichmäßige Feuchte im gesamten Betonquerschnitt zu erwarten. Es kann jedoch von einem Feuchtegleichgewicht mit den Umgebungsverhältnissen der Klimakammern in den Randzonen der Probekörper, wie im Bild 6.8 zu erkennen ist, ausgegangen werden.

Um diesem Sachverhalt bei der späteren Bewertung der dielektrischen Messergebnissen Rechnung zu tragen, wurden zusätzlich 10 mm dünne Betonscheiben (Abmessung $10 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$) gesägt und neben den Versuchskörpern in den Klimakammern gelagert. Numerische Berechnungen für 10 mm dicke Betonscheiben zeigten, dass in einem solchen Querschnitt nach 300 Tagen eine gleichmäßige Feuchteverteilung vorhanden ist.

6.4.2.2 Einfluss des Salzgehalts

Da Betonbauteile oftmals einer Streusalzbeaufschlagung oder einem salzhaltigen Sprühnebel ausgesetzt sind, wurde der Einfluss von Salzen auf das dielektrische Messergebnis untersucht. Die mit Spritz- und Oberflächenwasser an die Bauteiloberfläche herangetragenen Salze dringen in gelöster Form insbesondere durch kapillare Transportvorgänge in die offene Porenstruktur des erhärteten Betons ein und können das Messsignal bei der dielektrischen Messung, besonders im angewendeten Frequenzbereich, beeinflussen.

Der Einfluss des Salzgehalts wurde daher durch 2 Messserien mit unterschiedlichen Vorbehandlungs- und Lagerungsbedingungen eingehend untersucht.

6.4.2.2.1 Feuchte Vorlagerung

Versuchskörper der Betonserien A, B, C und D mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ sowie Betonscheiben mit den Abmessungen $10 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ wurden im Anschluss an eine 7-tägige Feuchtlagerung für eine Dauer von 90 Tagen in NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 60 und 120 g/l eingetaucht und danach bei verschiedenen relativen Luftfeuchten (33 %, 54 %, 75 % und 94 %) in den Klimakammern bis zum Prüftermin im Alter von 300 Tagen eingelagert. Die gewählten Lösungskonzentrationen und die Einlagerungsdauer sollten gewährleisten, dass während der Lagerung Chloridionen in ausreichender Menge in das Porengefüge des Betons eindringen [94].

6.4.2.2.2 Trockene Vorlagerung

Weitere Versuchskörper der Betonserien A, B, C und D mit den Abmessungen $20 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ sowie Betonscheiben mit den Abmessungen $10 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ trockneten im Anschluss an eine 7-tägige Nachbehandlung zunächst 56 Tage bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C und wurden danach in NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 0, 60 und 120 g/l eingelagert. Anschließend trockneten die Proben wiederum bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C.

6.4.2.3 Einfluss der Nachbehandlungsdauer

Die Nachbehandlung soll sicherstellen, dass auch in den oberflächennahen Bereichen des Betons ausreichend Wasser für die Hydratation des Zements zur Verfügung steht. Dies gilt vor allem bei der Einwirkung von Sonne oder trockenem Wind auf den jungen Beton.

Jeweils 2 identische Betonproben der Serien A, B, C und D mit den Abmessungen $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$ wurden 1 bzw. 7 Tage feucht nachbehandelt. Die dielektrischen Messungen wurden nach einer anschließenden Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C im Betonalter von 28, 90 und 180 Tagen durchgeführt. Dabei wurden je Prüftermin und Betonserie 2 Probekörper mit einer Nachbehandlungsdauer von 1 bzw. 7 Tagen gemessen.

Bei den Probekörpern mit einer feuchten Nachbehandlung von 1 Tag war es nicht möglich 10 mm dicke Scheiben zu sägen, da sie zum größten Teil zerbröckelten. Daher wurden lediglich Betonscheiben mit den Abmessungen $10 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ bei einer feuchten Nachbehandlung von 7 Tagen hergestellt.

6.4.3 Untersuchungsparameter bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integralen Messungen mit vier Sensoren

Bei einem vorhandenen Feuchtegradienten müssen die dielektrischen Messungen mit Sensoren unterschiedlichen Durchmessers vorgenommen werden, um über die verschiedenen Tiefenwirkungen der Sensoren (vgl. Bild 5.7) zerstörungsfrei ein Feuchteprofil zu erfassen.

Die dielektrischen Messungen wurden mit den Sensoren A, B, C und D vorgenommen. Zum Vergleich wurde der Feuchtegradient gravimetrisch ermittelt. Dazu dienten identisch hergestellte und identisch gelagerte zylinderförmige, mantel- und bodenversiegelte Parallelproben mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 30 cm, die zum jeweiligen Prüftermin in etwa 2 cm dicke Scheiben durch eine modifizierte Spaltzugbeanspruchung durch halbkreisförmige Manschetten senkrecht zur Zylinderachse gespalten wurden (vgl. Bild 6.9).

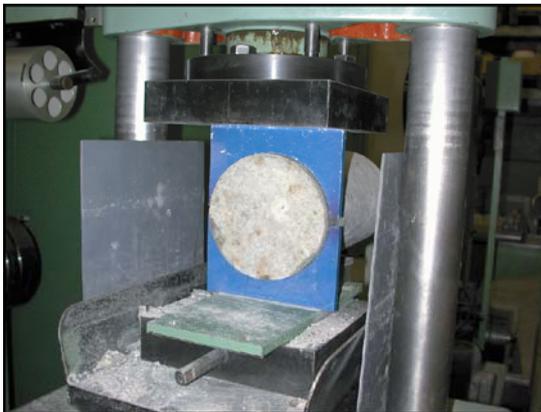


Bild 6.9: Modifizierte Spaltzugbeanspruchung durch halbkreisförmige Manschetten zur Spaltung der zylinderförmigen Proben senkrecht zur Zylinderachse

Der massenbezogene Wassergehalt der einzelnen Scheiben wurde in Anlehnung an die DIN 18121 Teil 1 [28] durch Trocknung im Ofen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz ermittelt (vgl. Bild 6.10).



Bild 6.10: Ermittlung des massenbezogenen Wassergehalts der Scheiben; links: Probenwägung; rechts: Probentrocknung im Ofen

6.4.3.1 Einfluss des Feuchtegehalts

Die dielektrische Bestimmung eines Feuchteprofils erfolgte an Betonplatten mit Abmessungen von $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$. Bild 6.11 zeigt das Einfüllen des Frischbetons in die Schalungen. Nach 7-tägiger Nachbehandlung mit feuchten Tüchern wurden die Proben 5-seitig mit Epoxidharz versiegelt (die nichtversiegelte Messfläche war hierbei die $50 \times 50 \text{ cm}^2$ glatte Schalungsseite) und anschließend im Freien horizontal und vertikal sowohl mit als auch ohne Überdachung ausgelagert.



Bild 6.11: Herstellung der $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ Betonplatten



Bild 6.12: Lagerung der $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ Betonproben sowie der zylinderförmigen Vergleichsproben im Freien horizontal und vertikal sowohl mit (rechts) als auch ohne Überdachung (links)

Zur gravimetrischen Bestimmung des Wassergehalts dienten die oben genannten zylinderförmige Parallelproben, deren Mantelflächen sowie eine der Stirnflächen mit PE-Folie versiegelt wurden (vgl. Bild 6.12). Die Auslagerung der Proben fand im September 2000 statt. Da-

bei herrschten relativ milde Klimabedingungen. Die Messungen wurden im Freien unter Berücksichtigung der zum Messzeitpunkt vorherrschenden Betontemperatur im Betonalter von 28 und 90 Tagen durchgeführt.

6.4.3.2 Einfluss des Salzgehalts

In diesen Versuchen zum Einfluss des Salzgehaltes wurden würfelförmige Probekörper mit einer Kantenlänge von 20 cm der Betonserien H und I im Anschluss an eine 7-tägige Nachbehandlung in feuchten Tüchern zunächst 10 Tage lang bei 50 °C im Ofen getrocknet. Danach konnten diese Proben bis zum Prüftermin am 28. Tag NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 0, 60 sowie 120 g/l kapillar aufnehmen. Die Proben wurden zunächst in Wannen auf Abstandhalter mit einer Dicke von 1 cm positioniert. Anschließend wurden die entsprechenden Salzlösungen bis zu einer Höhe von 1,5 cm vom Wannenboden eingegossen. Die Höhe der Salzlösungen wurde regelmäßig kontrolliert und gegebenenfalls nachgefüllt (siehe Bild 6.13).



Bild 6.13: Kapillare Aufnahme der Salzlösungen

6.4.3.3 Einfluss der Nachbehandlungsdauer

Um die Ausprägung eines Feuchtegradienten infolge der Nachbehandlung zu untersuchen, wurden Betone der Serien H und I (Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm) nach einer 1- bzw. 7-tägigen Feuchtlagerung fünfseitig versiegelt und bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C gelagert. Die dielektrischen Messungen erfolgten im Betonalter von 14, 28 und 90 Tagen.

7 Messergebnisse und Diskussion

7.1 Gleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integrale Messung mit einem Sensor

Die dielektrischen Messungen erfolgten in diesem Abschnitt ausschließlich mit dem Sensor B nach Abschnitt 5.2 und die Auswertung der Messergebnisse entsprechend Abschnitt 5.6.1, wobei der integrale Messwert des Wassergehalts nach dem Gleichungssystem (5.51) bestimmt wurde.

7.1.1 Einfluss der Temperatur

Die dielektrischen Messungen erfolgten an den Betonserien A und C bei einer Betontemperatur von 2, 10, 20, 35 und 50 °C im Alter von 28 Tagen. In Bild 7.1 ist der ermittelte Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz für die beiden Betonserien dargestellt.

Während der Einfluss der Temperatur auf den Realteil der Permittivitätszahl vermutlich aufgrund des relativ geringen Wassergehalts nur unwesentlich ist, ist der Einfluss der Temperatur auf den Imaginärteil der Permittivitätszahl bei gleichem Wassergehalt deutlich zu erkennen (siehe Bild 7.1). Dieses Verhalten ist mit der Verschiebung des Relaxationsmaximum des freien Wassers (vgl. Bild 3.7) sowie des physikalisch gebundenen Wassers (vgl. Bild 4.3 Rechts) mit abnehmender Temperatur hin zu größeren Relaxationszeiten zu begründen.

Bei der Berechnung des Wassergehalts wurde der Einfluss der Betontemperatur auf das dielektrische Verhalten des freien Wassers nach Gleichungen (3.20) bis (3.28) in Abschnitt 3.4.1.2 sowie des physikalisch gebundenen Wassers nach Gleichung (5.41) in Abschnitt 5.6.1 berücksichtigt.

Bild 7.2 zeigt eine Gegenüberstellung zwischen den gravimetrisch bestimmten und den dielektrisch gemessenen Wassergehalte für die Betonserien A und C. Die dielektrisch ermittelten Wassergehalte stellen Mittelwerte aus 12 dielektrischen Messungen an verschiedenen Stellen der Probe (6 Messungen auf jeder Seite, vgl. Bild 6.4) je Betonprobe dar. Eingezeichnet sind die entsprechenden Standardabweichungen der 12 dielektrischen Messungen sowie auch Linien, die eine Abweichung von $\pm 5\%$ bezogen auf den gravimetrisch bestimmten Wassergehalt verdeutlichen. Sämtliche Zahlenwerte enthält die Tabelle A 1 im Anhang.

Man erkennt, dass im untersuchten Temperaturbereich von 2 bis 50 °C keine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der Messwerte zu verzeichnen ist.

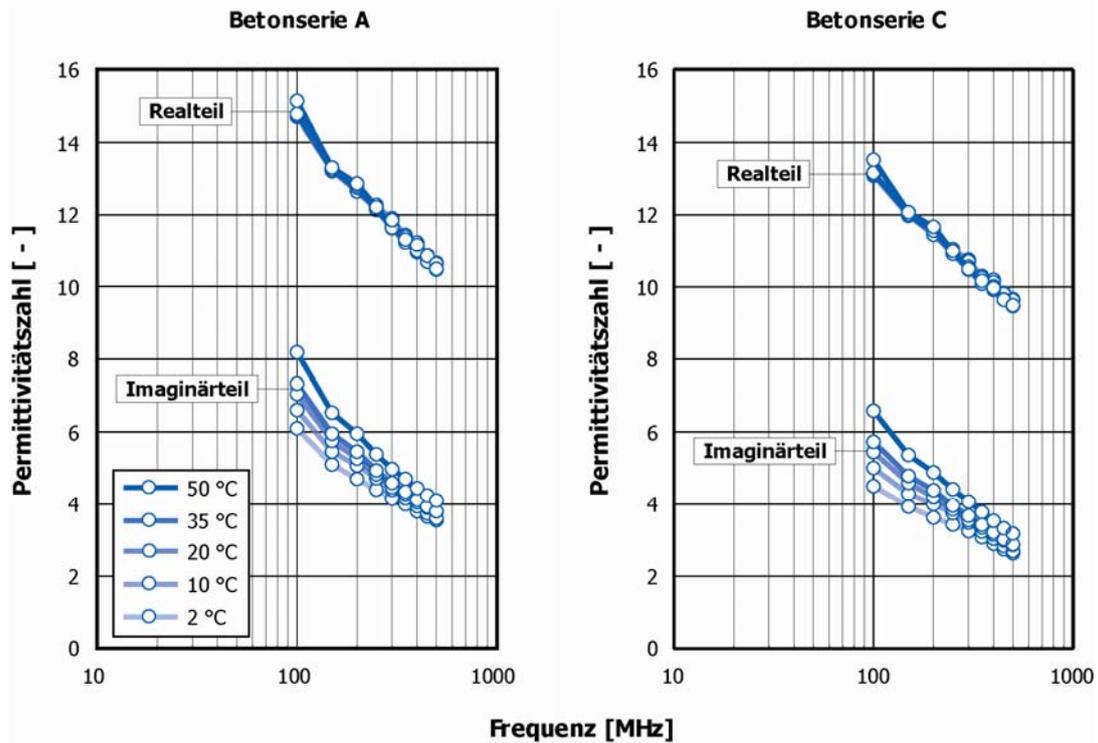


Bild 7.1: Ermittelte Real- und Imaginärteile der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlicher Betontemperatur für die Betonserien A und C

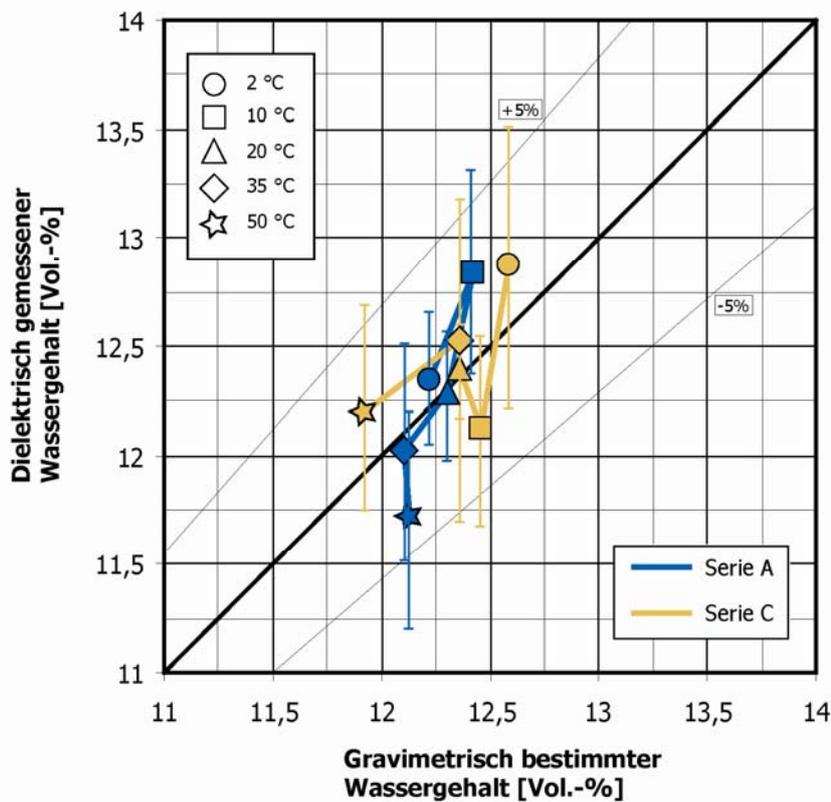


Bild 7.2: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts bei unterschiedlicher Betontemperatur (siehe auch Tabelle A 1 im Anhang) für die Betonserien A und C im Alter von 28 Tagen

Demzufolge hat die Temperatur des Betons im untersuchten Bereich von 2 °C bis 50 °C mit diesem neuartigen Mess- und Auswerteverfahren keinen nennenswerten Einfluss auf den gemessenen Wassergehalt. Eine Erfassung der Temperatur des untersuchten Betons um deren Einfluss zu kompensieren wird jedoch vorausgesetzt.

7.1.2 Einfluss des Hydratationsgrads

Um den Einfluss des Hydratationsprozesses des Zements und die damit verbundenen Strukturänderungen des Betons, insbesondere hinsichtlich der Ionenkonzentration der Porenlösung und des Wassergehalts, zu untersuchen, wurden dielektrische Messungen an den Betonserien B und D im Betonalter von 1, 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen bei 20 °C durchgeführt.

In Bild 7.3 bzw. Bild 7.4 sind die ermittelten Real- bzw. Imaginärteile der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlichem Betonalter für die Betonserien B bzw. D dargestellt.

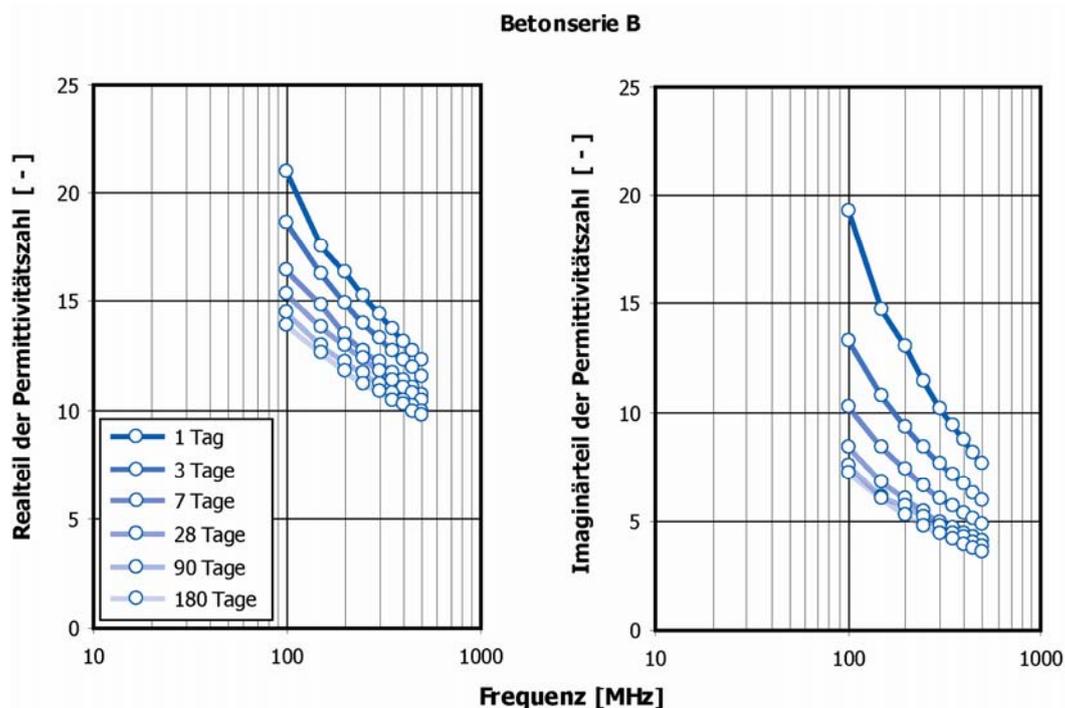


Bild 7.3: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlichem Betonalter am Beispiel der Betonserie B

In Bild 7.3 ist bei dem CEM I-Beton der Serie B deutlich zu erkennen, dass sowohl der Real- als auch der Imaginärteil der Permittivitätszahl mit zunehmendem Betonalter abnehmen. Einem ähnlichen Verlauf zeigte auch der CEM III-Beton der Serie D (vgl. Bild 7.4). Dieses Verhalten ist mit der durch die Hydratation verursachten Abnahme des Wassergehalts und der dadurch verursachte Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit zu begründen. Im Gegensatz zum CEM I-Beton, wies jedoch der Imaginärteil der Permittivitätszahl beim CEM III-Beton, aufgrund seiner geringeren Gesamtalkalikkonzentration der Porenlösung im Vergleich zum CEM I-Beton (vgl. Bild 4.7) geringere Werte auf.

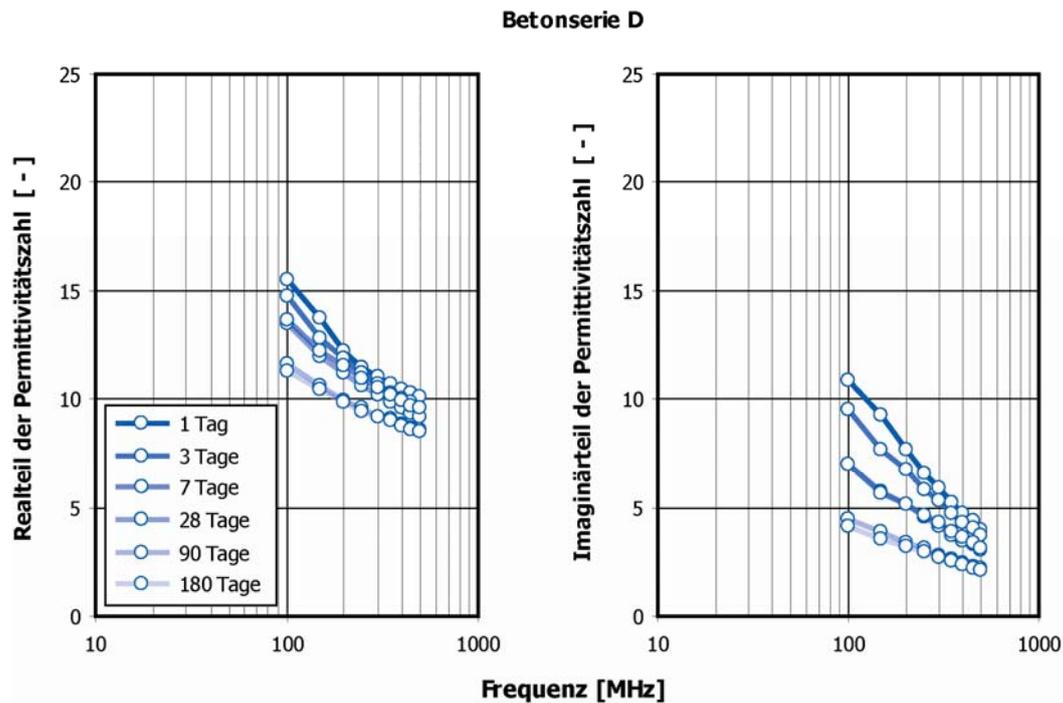


Bild 7.4: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlichem Betonalter am Beispiel der Betonserie D

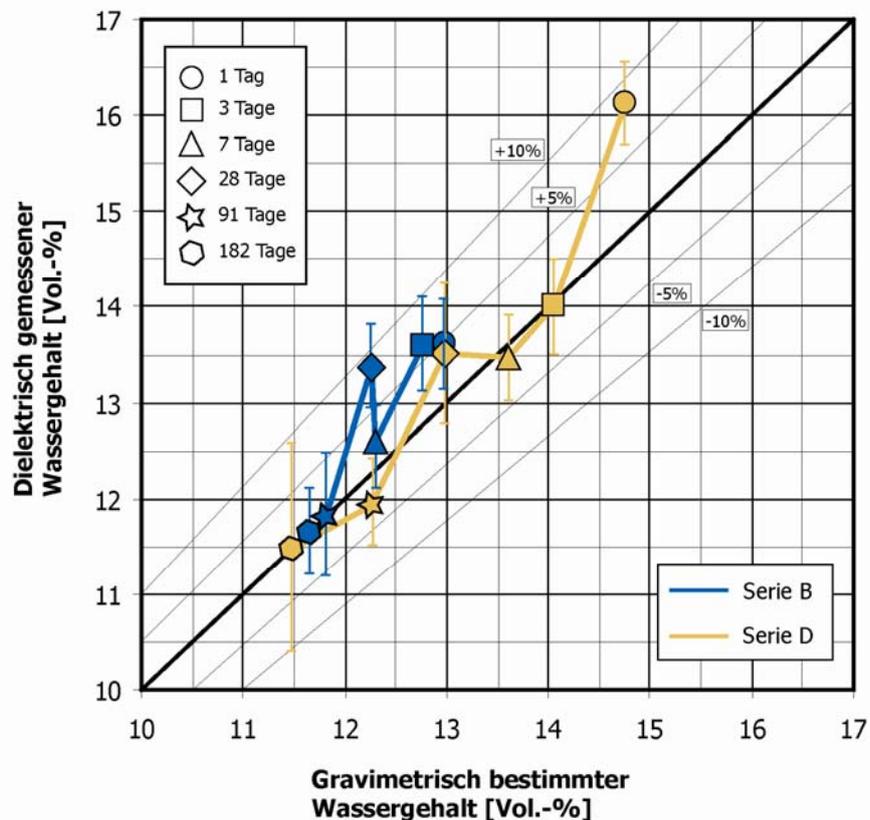


Bild 7.5: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts bei unterschiedlichem Betonalter (siehe auch Tabelle A 2 im Anhang) für die Betonserien B und D

Bild 7.5 bzw. die Tabelle A 2 im Anhang zeigt eine Gegenüberstellung des gravimetrisch bestimmten und des dielektrisch gemessenen Wassergehalts. Aus dem Bild 7.5 ist auch die deutlichere Abnahme des Wassergehalts mit zunehmendem Betonalter bei dem CEM III-Beton der Serie D gegenüber dem CEM I-Beton der Serie B zu erkennen. Zusätzlich sind Abweichungslinien von $\pm 5\%$ bzw. $\pm 10\%$ bezogen auf den gravimetrisch bestimmten Wassergehalt eingezeichnet.

Die 3 Messpunkte in Bild 7.5, die eine größere Abweichung als $\pm 5\%$ aufweisen, sind aufgrund der Heterogenität des Betons, der Messungenauigkeit zuzuschreiben.

Demnach hat auch das Betonalter im untersuchten Bereich von 1 Tag bis 182 Tagen keinen nennenswerten Einfluss auf den dielektrisch gemessenen Wassergehalt bzw. die tatsächlich vorhandene Tendenz wird von der dielektrischen Messung korrekt wiedergegeben. Folglich ist für die Praxis eine vorherige Kenntnis des Betonalters nicht notwendig.

7.1.3 Einfluss des Größtkorns des Betons

Die Untersuchungen zum Einfluss der Korngröße wurden an den Betonserien E, F und G mit den Größtkornabmessungen von 8, 16 und 32 mm durchgeführt. Der Wasserzementwert ($w/z = 0,65$) sowie der Zementgehalt der CEM I-Betone (320 kg/m^3) blieben dabei unverändert. Die dielektrischen Messungen erfolgten an den Versuchskörpern im Betonalter von 2, 5 und 65 Tagen bei einer Temperatur von 20°C .

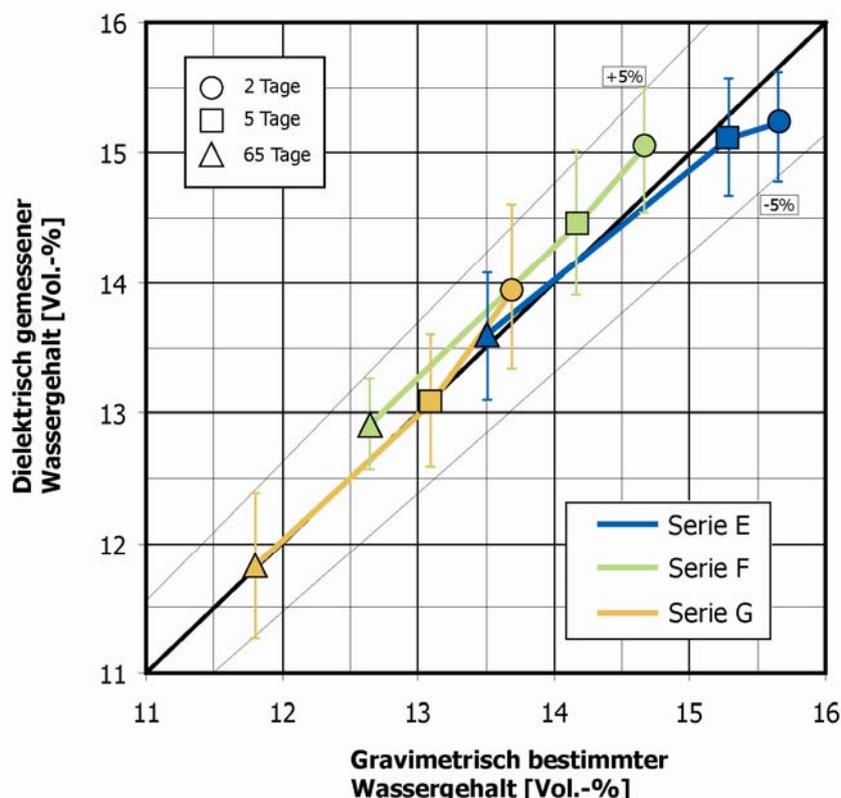


Bild 7.6: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts bei den Betonserien E, F und G mit Größtkornabmessungen von 8, 16 und 32 mm im Betonalter von 2, 5 und 65 Tagen

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gravimetrisch bestimmtem und dielektrisch gemessenem Wassergehalt ist in Bild 7.6 zu erkennen. Vergleicht man die Betonserien untereinander, kann man die Abnahme des Wassergehalts, die auf die höhere Porosität der Betone mit geringerer Korngröße zurückzuführen ist, mit zunehmender Korngröße deutlich erkennen. Die Tabelle A 3 im Anhang enthält die Zusammenstellung der entsprechenden Zahlenwerte.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass trotz vorhandenem Einfluss der Korngröße auf den Wassergehalt wird der dielektrisch gemessene Wassergehalt korrekt wiedergegeben. Für die Praxis ist demzufolge eine vorherige Kenntnis der Größtkornabmessungen bzw. die Sieblinie des Zuschlags nicht notwendig.

7.1.4 Einfluss des Bewehrungsgrads

Die Untersuchungen zum Einfluss des Bewehrungsgrads wurden an den Betonen H und J mit Wasserzementwerten von 0,45 bzw. 0,65 bei drei Bewehrungsgraden 0,36 %; 0,8 % und 2,5 % jeweils mit einer üblichen Betondeckung von 3 cm sowie an Vergleichsprobekörpern ohne Bewehrung im Betonalter von 7 und 28 Tagen durchgeführt. Um die Bewehrung durch das elektromagnetische Feld zu erfassen wurde der Sensor D, der die höchste Eindringtiefe aufweist, eingesetzt.

Aus den ermittelten Real- und Imaginärteilen der Permittivitätszahl, die im Bild 7.7 dargestellt sind, geht hervor, dass bei den größeren Bewehrungsgraden von 0,8 % und 2,5 %, wie erwartet, ein deutlich anderes dielektrisches Verhalten gegenüber unbewehrtem Beton zu beobachten ist. Dies resultiert aus den zusätzlichen Wechselwirkungen der magnetischen Eigenschaften der eisenhaltigen Bewehrung mit dem elektromagnetischen Feld.

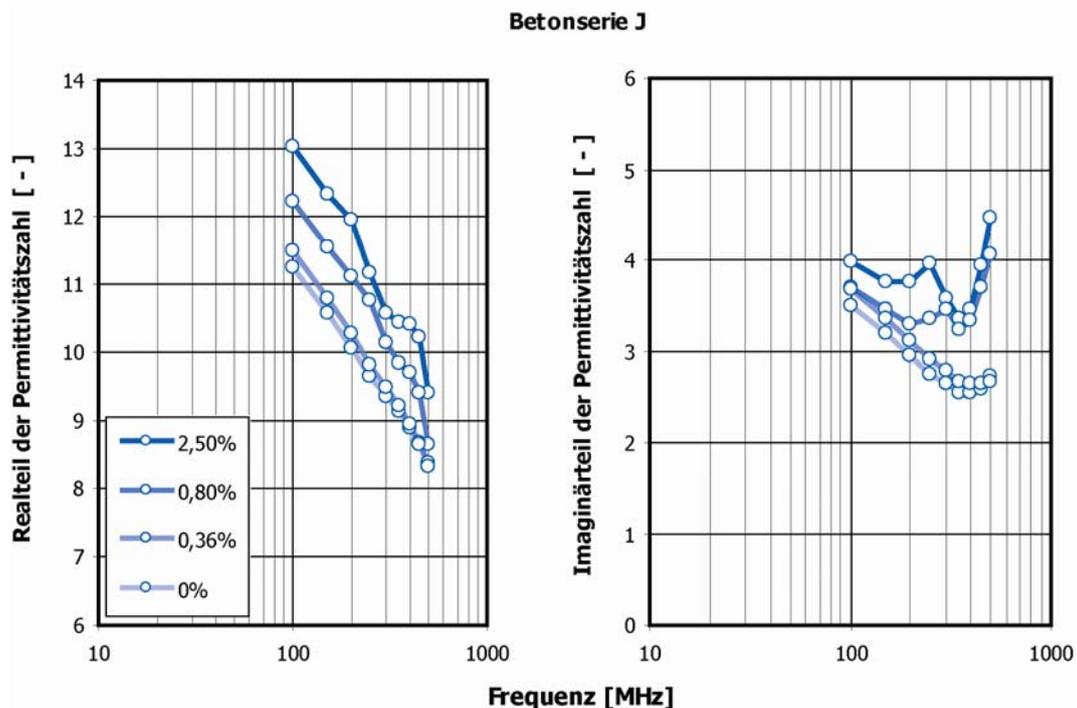


Bild 7.7: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl als Funktion der Frequenz bei unterschiedlichen Bewehrungsgraden am Beispiel der Betonserie J im Alter von 28 Tagen

Bei dem Beton mit einem Bewehrungsgrad von 0,36 % sind diese Wechselwirkungen noch als vernachlässigbar gering einzustufen. Dies kann man aus dem frequenzabhängigen Ver-

lauf des Real- und des Imaginärteils der Permittivitätszahl im Bild 7.7 erkennen, der nahezu einen identischen Verlauf zu den unbewehrten Beton aufweist.

Das Bild 7.8 zeigt eine Gegenüberstellung des gravimetrisch bestimmten und des dielektrisch gemessenen Wassergehalts der Betonserie J und H mit Bewehrungsgraden von 0; 0,36; 0,8 und 2,5 % im Betonalter von 7 Tagen. Die Tabelle A 4 im Anhang enthält die Zusammenstellung sämtlicher Ergebnisse der Betonserien H und J.

Bei der Vergleichsprobe ohne Bewehrung zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gravimetrisch bestimmten und den dielektrisch gemessenen Wassergehalten. Die Messabweichung zwischen den gravimetrisch bestimmten und den dielektrisch gemessenen Wassergehalten beim Beton mit dem Bewehrungsgrad von 0,36 % in der Größenordnung von etwa $\pm 10\%$ könnte der Heterogenität des Betons zugeschrieben werden. Die errechneten Wassergehalte für die Betone mit den Bewehrungsgraden von 0,8 % und 2,5 % können (außer bei der Betonserie H im Alter von 7 Tagen) jedoch nicht akzeptiert werden.

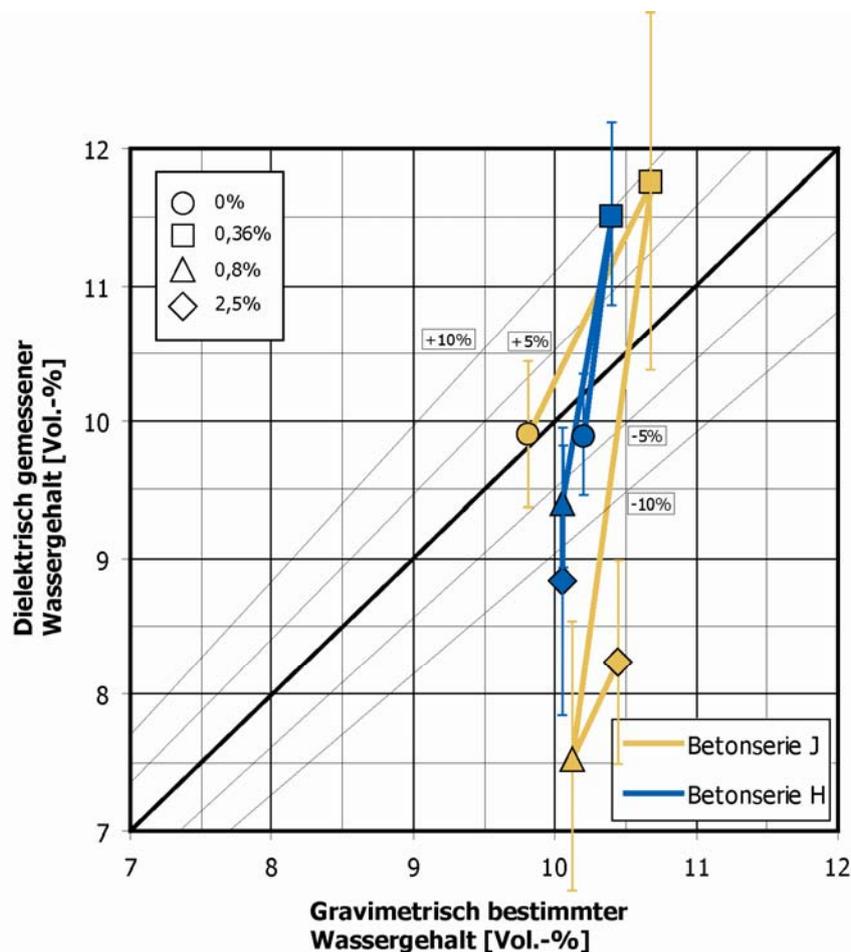


Bild 7.8: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts der Betonserie J mit Bewehrungsgraden von 0; 0,36; 0,8 und 2,5 % im Betonalter von 7 Tagen

Demzufolge ist der Einfluss einer Bewehrung im Messbereich des Sensors auf den gemessenen Wassergehalten nicht zu vernachlässigen.

In diesem Zusammenhang kann man sich jedoch eine einfache Abhilfe schaffen, indem man auf dem Markt befindliche Bewehrungssuchgeräte einsetzt und ohne größeren Aufwand eine geeignete Messstelle zwischen den Bewehrungen lokalisiert.

7.2 Ungleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integrale Messung mit einem Sensor

Die dielektrischen Messungen erfolgten ausschließlich mit dem Sensor B nach Abschnitt 5.2 und die Auswertung der Messergebnisse entsprechend Abschnitt 5.6.1, wobei der integrale Messwert des Wassergehalts nach Gleichung (3.33) bestimmt wurde.

7.2.1 Einfluss des Feuchtegehalts

Die Betonprobekörper der Betonserien A, B, C und D wurden im Rahmen dieser Versuchsserie nach einer Lagerung von 300 Tagen in Klimakammern mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten dielektrisch gemessen.

In Bild 7.9 ist der nach der Lagerung resultierende Wassergehalt für alle untersuchten Betonserien in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte dargestellt. Der Serienvergleich zeigt den langsameren Trocknungsverlauf der Serien A und C mit Wasserzementwert von 0,45 im Vergleich zu den Serien B und D mit Wasserzementwert von 0,65.

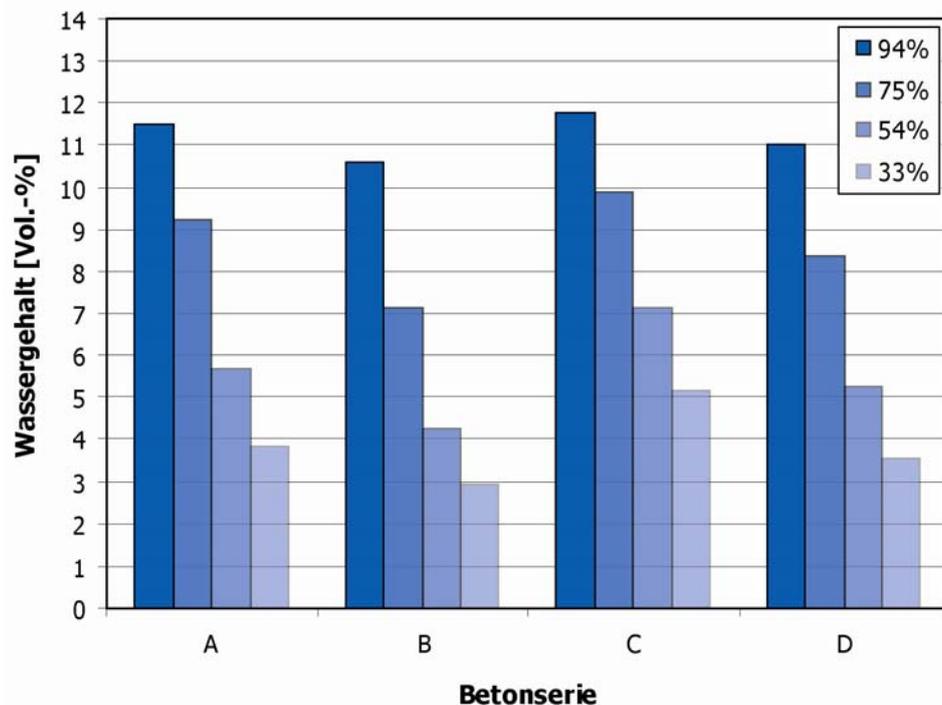


Bild 7.9: Resultierender Wassergehalt bei allen untersuchten Betonserien nach einer Lagerung von 300 Tagen in Klimaboxen

Die numerischen Berechnungen für eine 50 mm dicke Betonplatte zeigten (vgl. Bild 6.8, Abschnitt 6.4.2), welche Feuchteverteilungen im Betonquerschnitt nach dieser Trocknungsdauer zu erwarten ist. Ein annäherndes Feuchtegleichgewicht mit den Umgebungsverhältnissen der Klimakammern stellt sich dabei nur in den Randzonen der 50 mm dicken Probekörper ein. Zur Bewertung der dielektrischen Messergebnisse wurden deshalb auch gravimetrisch bestimmte Wassergehalte von 10 mm dünnen Betonscheiben herangezogen, die den Feuchtegehalt der Randzone eines Probekörpers mit einer Dicke von 50 mm repräsentieren sollen.

Die Messergebnisse der an den verschiedenen Betonen durchgeführten dielektrischen und gravimetrischen Messungen sind am Beispiel der Betonserien B und D im Bild 7.10 darge-

stellt. Sämtliche Ergebnisse aller untersuchten Betonserien (A, B, C und D) sind in der Tabelle A 5 im Anhang enthalten. Dabei veranschaulicht der Vergleich mit dem gravimetrisch bestimmten Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben (Bezeichnung: Sorption), inwieweit im Inneren der 50 mm dicken Betonproben noch ein höherer Wassergehalt vorhanden ist.

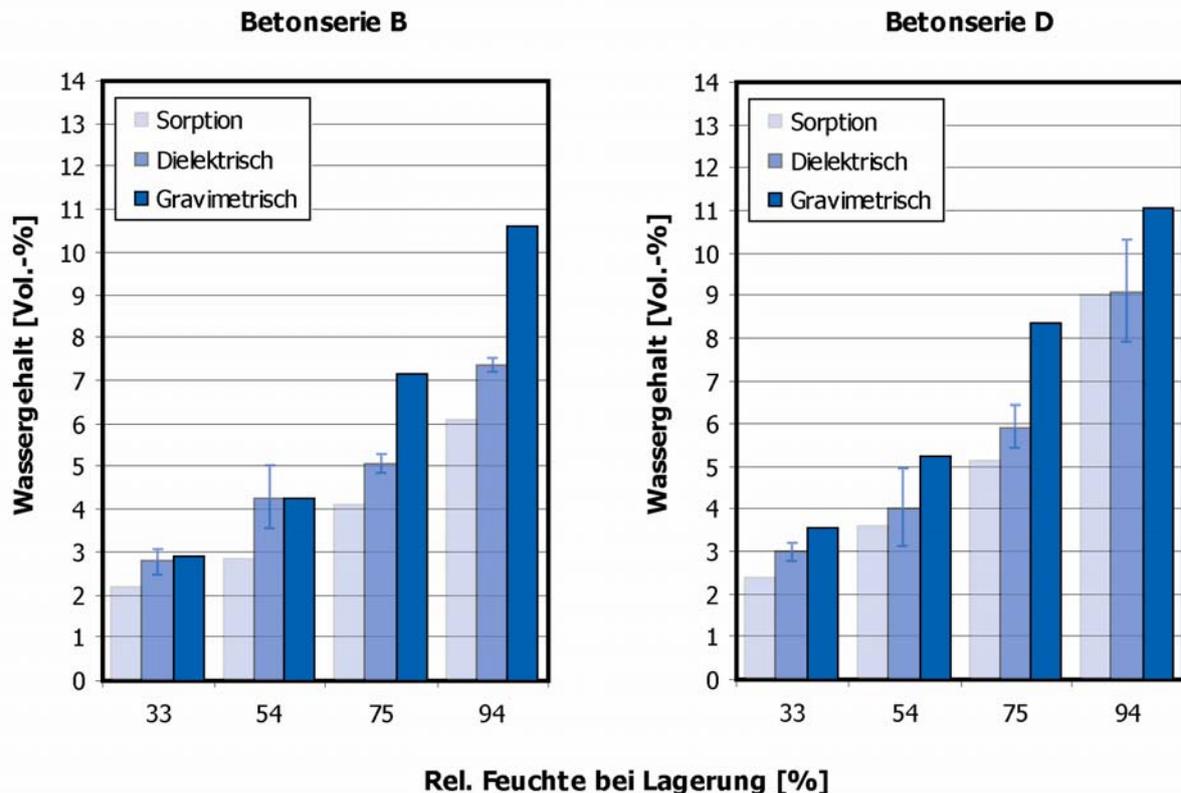


Bild 7.10: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts der Betonserien B und D bei Lagerung in unterschiedlicher relativer Luftfeuchte im Betonalter von 300 Tagen. In der Darstellung ist auch der gravimetrisch bestimmte Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben angegeben (Bezeichnung: Sorption)

Die dielektrisch gemessenen Wassergehalte im Bild 7.10 liegen meist zwischen den Werten, die gravimetrisch an den Proben mit einer Dicke von 50 mm bzw. 10 mm bestimmt wurden. Dieser Effekt ist mit der abnehmenden Intensität der elektrischen Feldstärke des Sensors mit zunehmendem Abstand zur Betonoberfläche zu erklären. Wie auch die numerischen Berechnungen zeigten (Abschnitt 5.3), nimmt der Verlauf der elektrischen Feldstärke mit zunehmendem Abstand zur Sensorebene exponentiell ab. Demzufolge können die Wasseranteile im inneren und an den Randzonen der Betonproben nicht mit der gleichen Intensität erfasst werden. Zudem ist anzumerken, dass die Eindringtiefe des Sensors B (vgl. Bild 5.7) im Wesentlichen auf eine Randzone des Betons von 1 cm Dicke beschränkt ist. Dadurch wird der feuchte Kern der Betonprobe nicht erfasst.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Untersuchungen bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor nach Abschnitt 7.2 eine erste Abschätzung darstellt, ein Feuchteprofil dielektrisch zu erfassen. In Abschnitt 7.3 wird eine praxistaugliche Möglichkeit zur dielektrischen Erfassung eines Feuchtegradienten eingehend diskutiert.

7.2.2 Einfluss des Salzgehalts

7.2.2.1 Feuchte Vorlagerung

Versuchskörper der Betonserien A, B, C und D lagerten zunächst über einen Zeitraum von 90 Tagen in NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 0; 60 und 120 g/l. Danach trockneten die einzelnen Prüfkörper in Klimakammern mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bis zu einem Betonalter von 300 Tagen.

In Bild 7.11 ist der nach der Lagerung resultierende Wassergehalt für alle untersuchten Betonserien in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte am Beispiel der Probekörper mit einer Salzkonzentration von 60 g/l dargestellt.

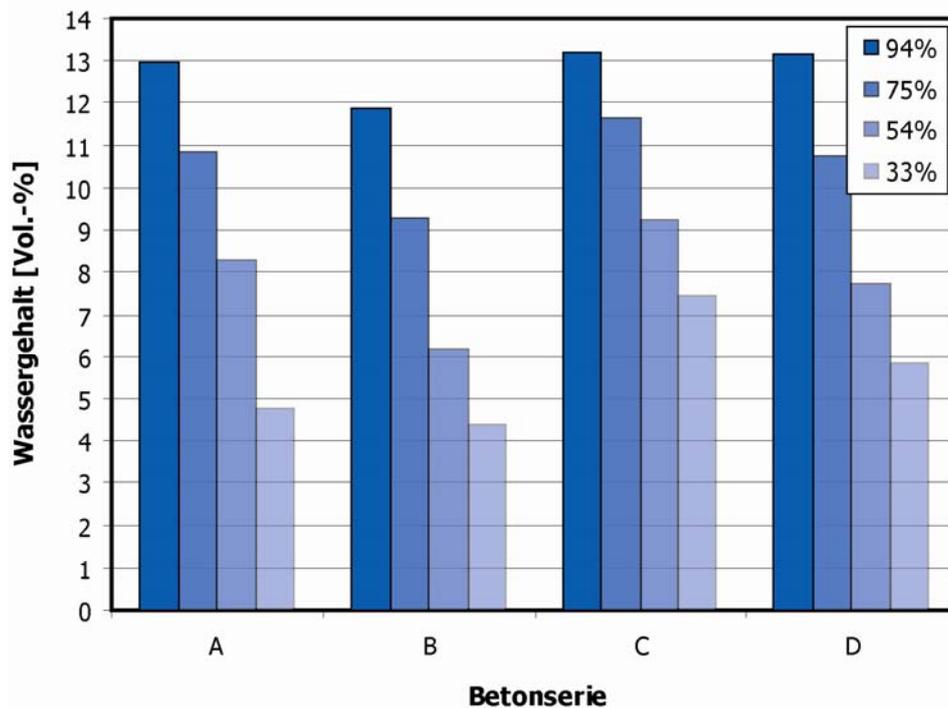


Bild 7.11: Resultierender Wassergehalt bei allen untersuchten Betonserien am Beispiel der Probekörper mit einer Salzkonzentration von 60 g/l nach einer Lagerung von 210 Tagen in Klimaboxen

Die ermittelten Permittivitätszahlen bei Salzkonzentrationen von 0; 60 und 120 g/l sind im Bild 7.12 in Abhängigkeit von der Frequenz am Beispiel der bei 94 % relativer Luftfeuchte (r. F.) gelagerten Versuchskörper der Betonserie B und im Bild 7.13 der Betonserie D dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der starke Einfluss des Salzgehalts auf die Permittivitätszahlen bei gleichem Wassergehalt der Betonproben. Dabei nehmen sowohl der Real- als auch der Imaginärteil mit steigender Salzkonzentration zu.

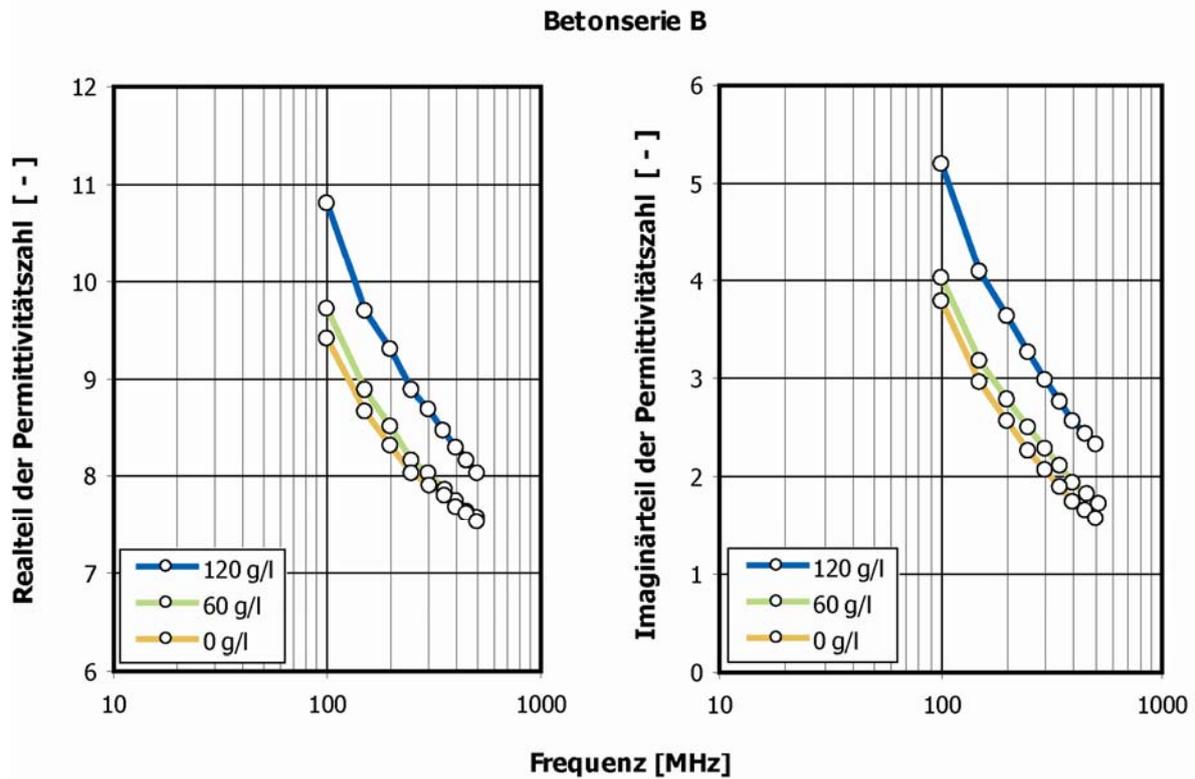


Bild 7.12: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlichen Salzgehalten in der Lagerungslösung am Beispiel der bei 94 % r. F. gelagerten Versuchskörper der Betonserie B

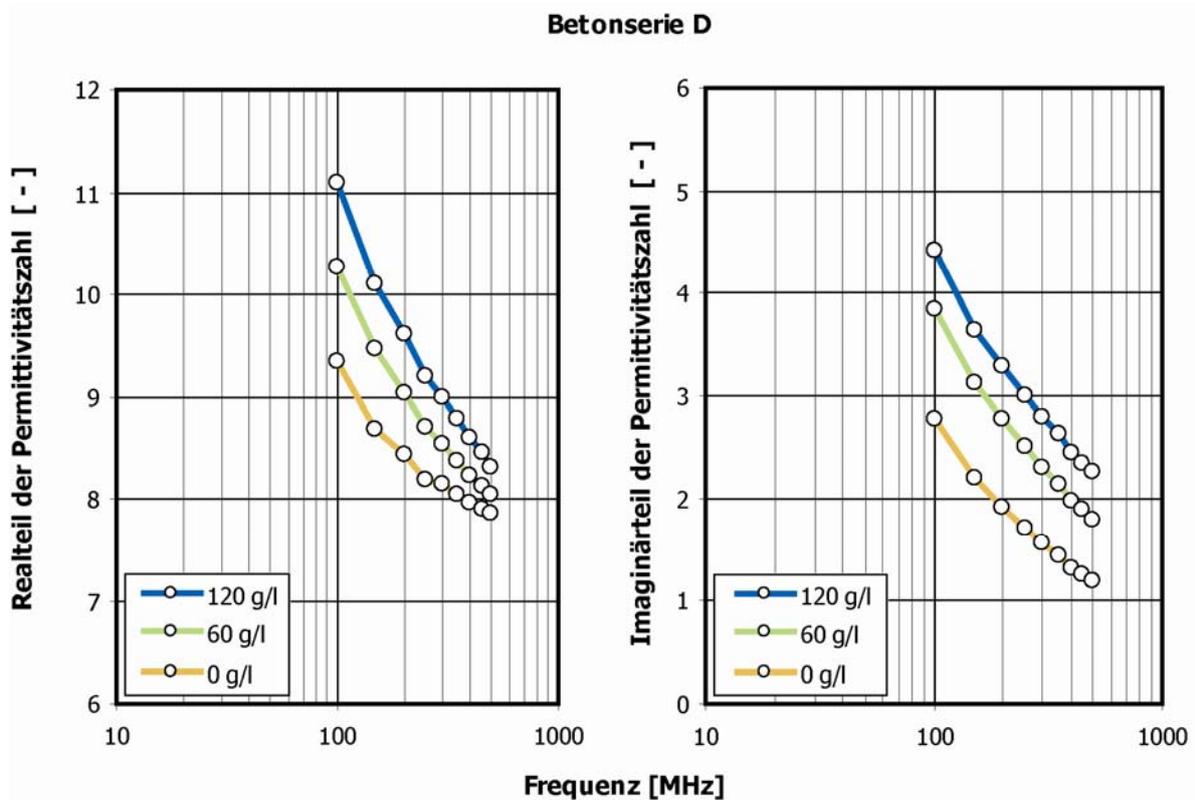


Bild 7.13: Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in Abhängigkeit von der Frequenz bei unterschiedlichen Salzgehalten in der Lagerungslösung am Beispiel der bei 94 % r. F. gelagerten Versuchskörper der Betonserie D

Die dielektrisch gemessenen und die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der bei 54 % r. F. gelagerten Versuchskörper der Betonserien B und D, die zuvor auch in NaCl-Lösungen mit Konzentrationen von 0, 60 und 120 g/l über 90 Tage eingelagert wurden, sind im Bild 7.14 dargestellt. In diesem Bild ist auch der gravimetrisch ermittelte Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben angegeben (Bezeichnung: Sorption). Sämtliche Ergebnisse aller untersuchten Betonserien sind in der Tabelle A 6 im Anhang zusammengestellt.

Trotz der erheblichen Abweichungen in den Permittivitätszahlen bei unterschiedlichen Salzgehalten und gleichem Wassergehalt (vgl. Bild 7.12 und Bild 7.13) konnte mit diesem neuartigen Mess- und Auswerteverfahren der Salzeinfluss vollständig ausgeschaltet werden. Wie aus dem Bild 7.14 hervorgeht, sind die dielektrisch ermittelten Wassergehalte trotz unterschiedlicher Salzgehalte nahezu gleich. Dies gilt auch für die Betonproben, die bei anderen relativen Luftfeuchten im Anschluss an die Lagerung in den NaCl-Lösungen trockneten (vgl. Tabelle A 6 im Anhang).

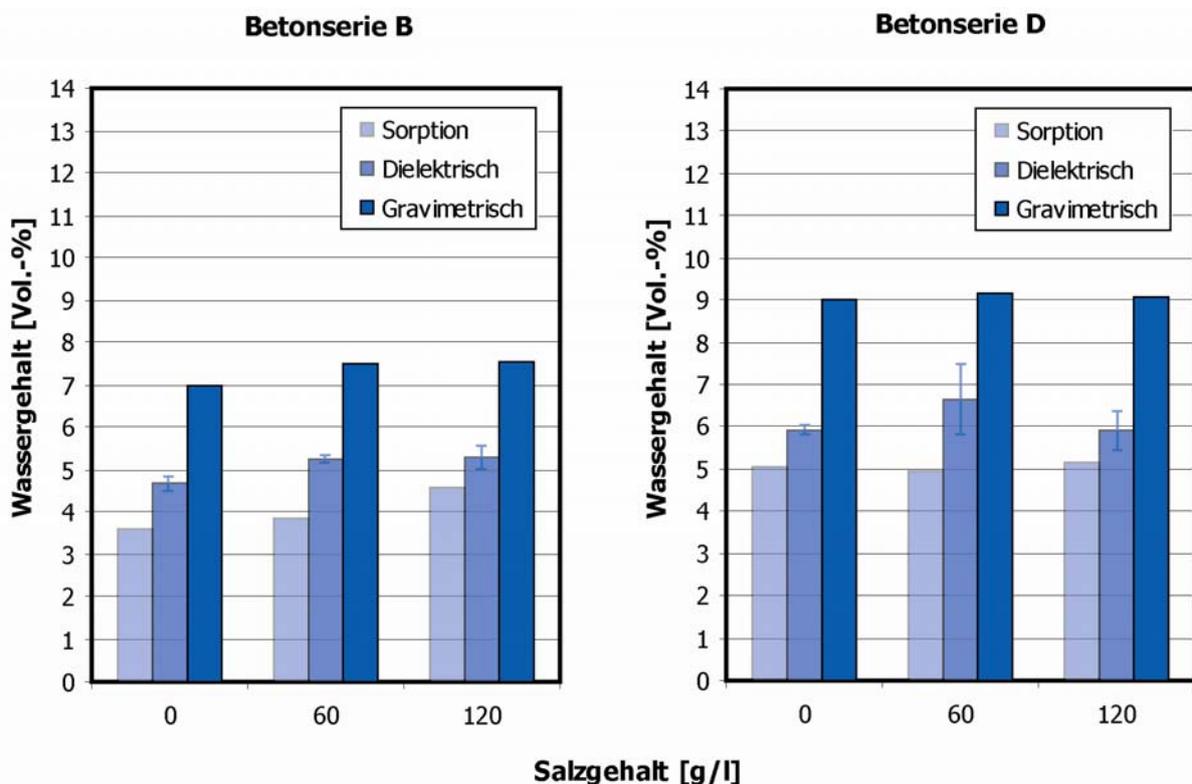


Bild 7.14: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts der Versuchskörper der Betonserien B und D nach Lagerung in unterschiedlichen Salzkonzentrationen über 90 Tage und anschließender Trocknung bei 54 % r. F. bis zum Betonalter von 300 Tagen. Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben (Bezeichnung: Sorption)

Im Bild 7.15 sind die Ergebnisse der dielektrischen und der gravimetrischen Messungen an salzhaltigen Proben nach der Trocknung (bis zum Alter von 300 Tagen) bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten am Beispiel der Probekörper der Betonserie B und D dargestellt, die vorher über 90 Tage in einer NaCl-Lösung mit einer Salzkonzentration von 120 g/l lagerten.

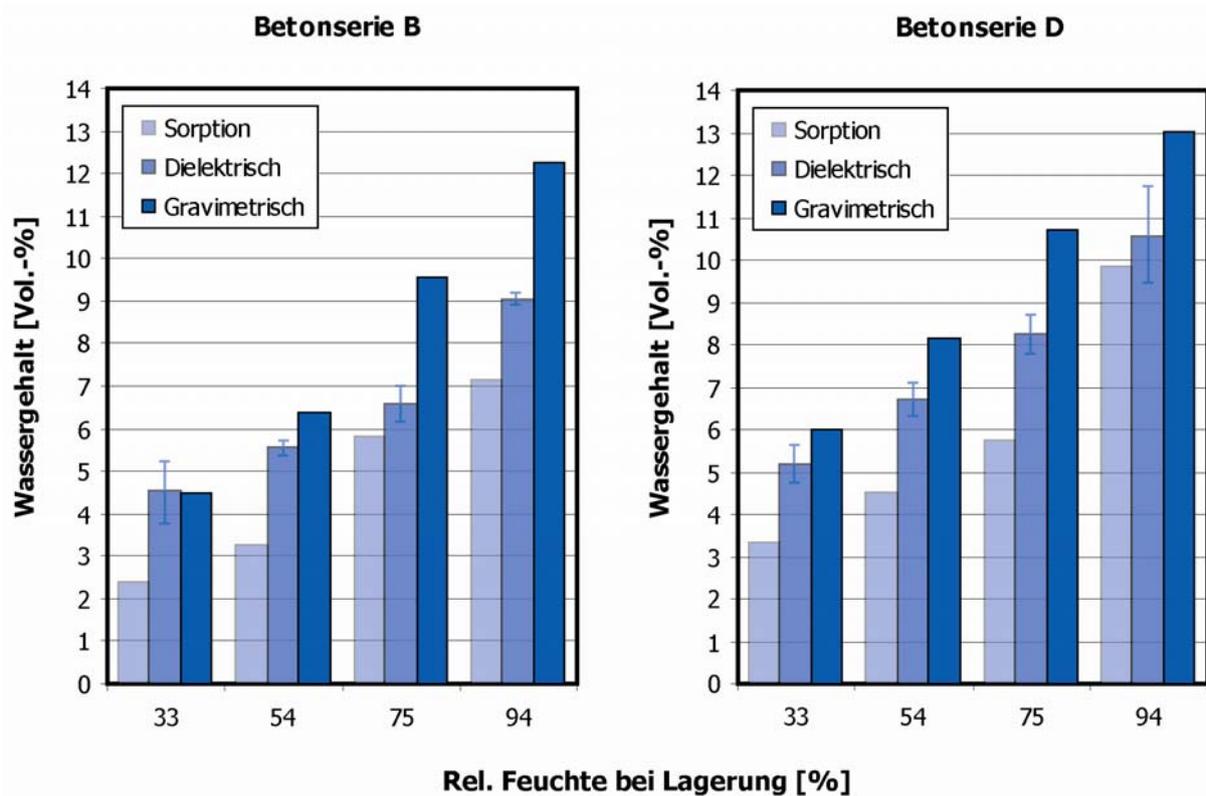


Bild 7.15: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts der Probekörper der Betonserien B und D, die in einer Salzkonzentration von 120 g/l lagerten und danach bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bis zum Alter von 300 Tagen trockneten. Wassergehalt der Betonscheiben mit einer Dicke von 10 mm (Bezeichnung: Sorption)

Die dielektrisch gemessenen Wassergehalte liegen bei allen Messungen vorwiegend zwischen den Werten, die gravimetrisch an den Proben mit einer Dicke von 50 mm bzw. 10 mm bestimmt wurden. Hierbei konnte für deren unterschiedliche Abweichungen, im Vergleich zu dem gravimetrisch ermittelten Wassergehalt an den 10 mm dicken Betonscheiben, kein Zusammenhang auf die untersuchten Parameter festgestellt werden. Diese Abweichungen sind der Messunsicherheit zuzuschreiben.

7.2.2.2 Trockene Vorlagerung

Weitere Versuchskörper der Betonserien A, B, C und D mit den Abmessungen 20 x 10 x 5 cm³ trockneten im Anschluss an eine 7-tägige Nachbehandlung zunächst 56 Tage bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C und wurden danach in NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 0; 60 und 120 g/l eingelagert. Anschließend trockneten die Proben wiederum bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C. Sämtliche Ergebnisse dieser Versuchsserie zum Einfluss des Salzgehalts und Lagerung der Proben (Betone A, B, C und D) bei einer relativen Luftfeuchte von 65 % enthält die Tabelle A 7 im Anhang.

In Bild 7.16 ist der nach der Lagerung resultierende Wassergehalt für alle untersuchten Betonserien in Abhängigkeit der Trocknungsdauer am Beispiel der Probekörper mit einer Salzkonzentration von 60 g/l dargestellt.

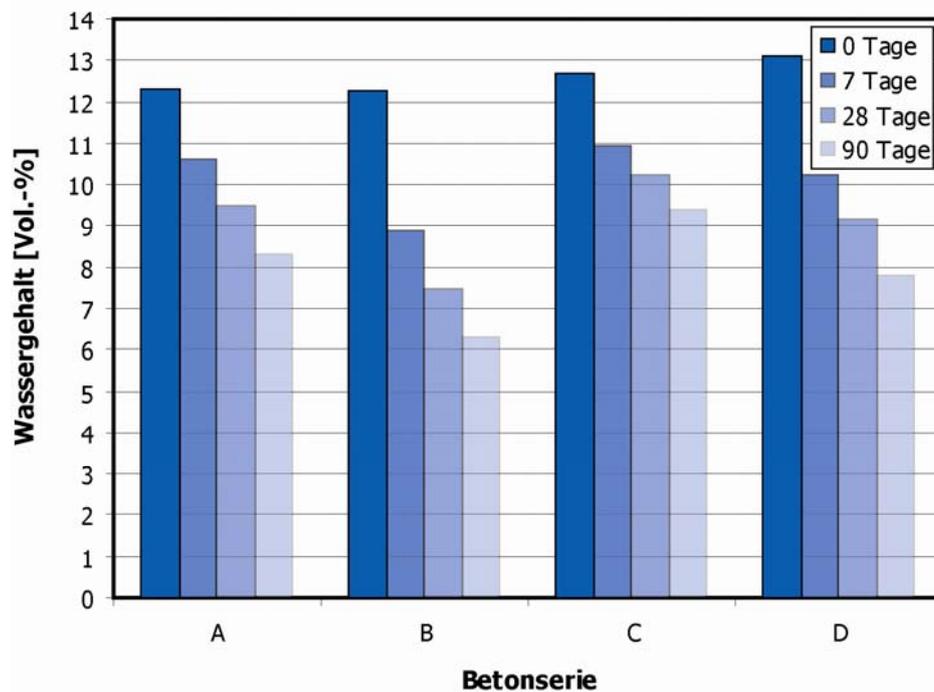


Bild 7.16: Nach der Lagerung resultierenden Wassergehalt bei allen untersuchten Betonserien am Beispiel der Probekörper mit einer Salzkonzentration von 60 g/l

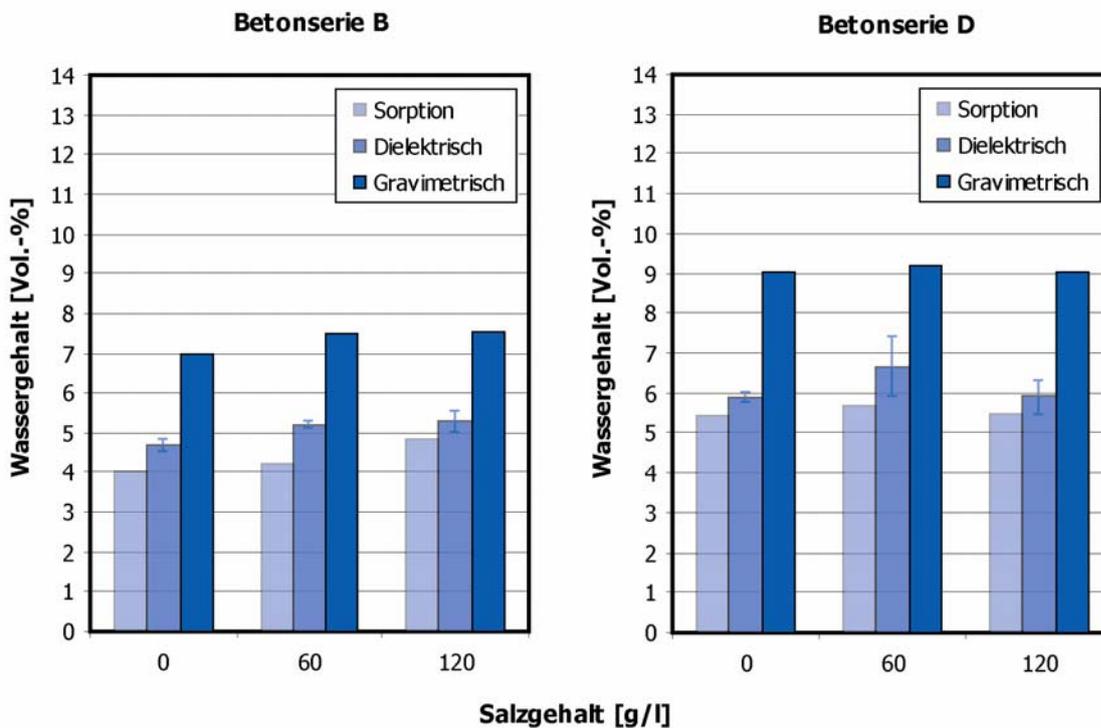


Bild 7.17: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts der Betonserien B und D nach einer Trocknungsdauer von 28 Tagen. Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben (Bezeichnung: Sorption). Die Proben wurden 7 Tage feucht nachbehandelt, 56 Tage bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C getrocknet, danach in NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 0; 60 und 120 g/l eingelagert und anschließend wieder bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C gelagert

Der Serienvergleich zeigt den langsameren Trocknungsverlauf der Serien A und C mit dem Wasserzementwert von 0,45 im Vergleich zu den Serien B und D mit dem Wasserzementwert von 0,65.

Die nach 28-tägiger Trocknung dielektrisch gemessenen und gravimetrisch bestimmten Wassergehalte sind am Beispiel der Betonserien B und D im Bild 7.17 aufgetragen. In der Darstellung ist auch der gravimetrisch ermittelte Wassergehalt der Betonscheiben mit einer Dicke von 10 mm angegeben (Sorption).

Auch bei diesen Versuchsserien liegen die dielektrisch gemessenen Wassergehalte bei allen Messungen zwischen den Werten, die gravimetrisch an den Proben mit einer Dicke von 50 mm bzw. 10 mm bestimmt wurden. Wie schon erwähnt, ist dieser Effekt mit der abnehmenden Intensität der elektrischen Feldstärke des Sensors mit zunehmendem Abstand zur Betonoberfläche zu erklären. Demzufolge können die Wasseranteile im inneren und an den Randzonen der Betonproben nicht mit der gleichen Intensität erfasst werden.

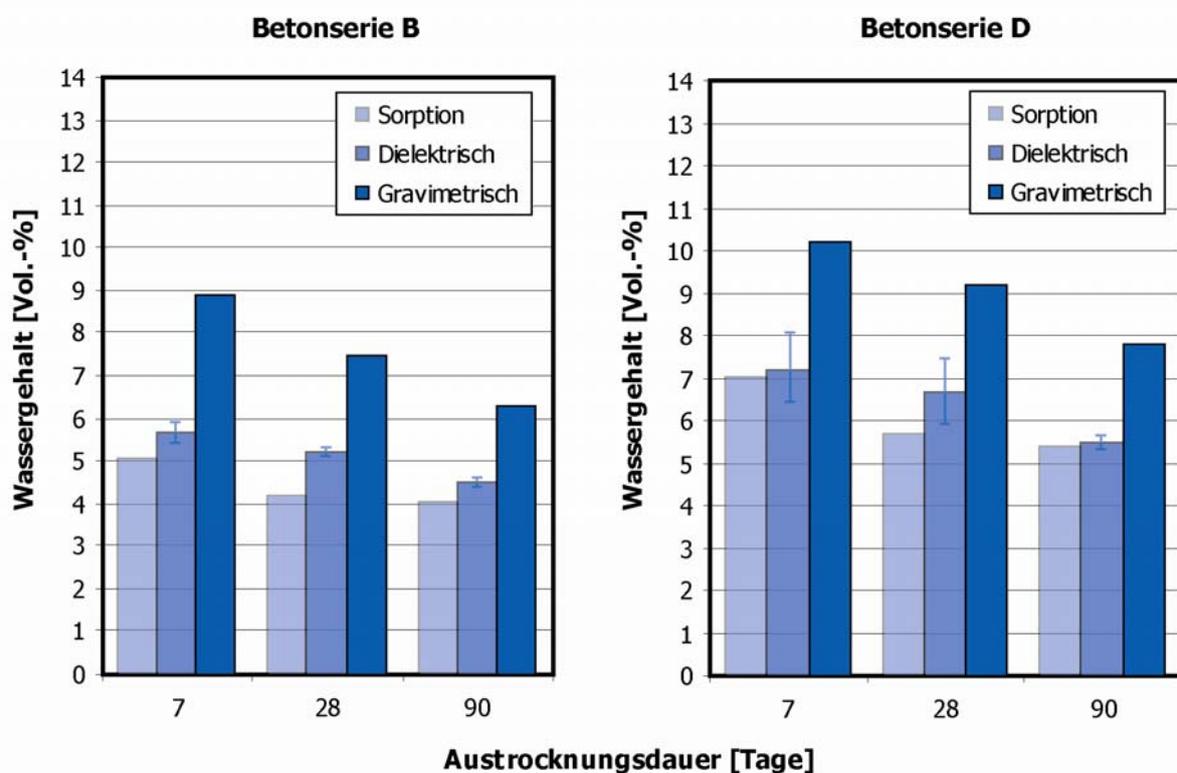


Bild 7.18: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts der mit einer Salzkonzentration von 60 g/l beaufschlagten Versuchskörper der Betonserie B nach unterschiedlich langer Austrocknungsdauer. Angegeben ist auch der Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben (Bezeichnung: Sorption). Die Proben wurden 7 Tage feucht nachbehandelt, 56 Tage bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C getrocknet, danach in NaCl-Lösung mit einer Salzkonzentration von 60 g/l eingelagert und trockneten danach wieder bei einer relativen Feuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C

Die dielektrisch gemessenen und gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der mit einer Salzkonzentration von 60 g/l beaufschlagten Versuchskörper der Betonserien B und D sind im Bild 7.18 in Abhängigkeit von der Austrocknungsdauer aufgetragen. In der Darstellung ist auch der gravimetrisch bestimmte Wassergehalt der Betonscheiben mit einer Dicke von 10

mm angegeben (Sorptions). Deutlich erkennbar ist in Bild 7.18 die Abnahme des Wassergehalts der 10 mm dicken Betonscheiben mit zunehmender Austrocknungsdauer.

Auch in dieser Versuchsserie (Trocknung bei 65 % relativer Feuchte nach Lagerung in NaCl-Lösung) zeigte sich, dass der dielektrisch bestimmte Wassergehalt der Proben trotz des Salzgehalts stets zwischen den Werten liegt, die gravimetrisch an den Proben mit einer Dicke von 50 mm bzw. 10 mm bestimmt wurden.

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden: Der Wassergehalt der Proben mit einer Dicke von 10 mm soll den Feuchtegehalt der Randzone eines Probekörpers mit einer Dicke von 50 mm repräsentieren. Dabei veranschaulicht der Vergleich mit dem gravimetrisch bestimmten Wassergehalt der 10 mm dünnen Betonscheiben, inwieweit im Inneren der 50 mm dicken Betonproben noch ein höherer Wassergehalt vorhanden ist. Aufgrund der Tatsache, dass die dielektrisch bestimmten Wassergehalte der Proben vorwiegend zwischen den Werten lagen, die gravimetrisch an Proben mit einer Dicke von 10 mm bzw. an Proben mit einer Dicke von 50 mm bestimmt wurden, zeigt, dass die Möglichkeit zur Bestimmung eines Feuchtegradienten mit dieser Messmethodik gegeben ist.

7.2.3 Einfluss der Nachbehandlungsdauer

Die Betone der Serien A, B, C und D wurden im Anschluss an das Entschalen 1 Tag bzw. 7 Tage feucht nachbehandelt. Die dielektrischen und die gravimetrischen Bestimmungen des Feuchtegehalts erfolgten nach einer Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C im Betonalter von 28; 90 und 180 Tagen.

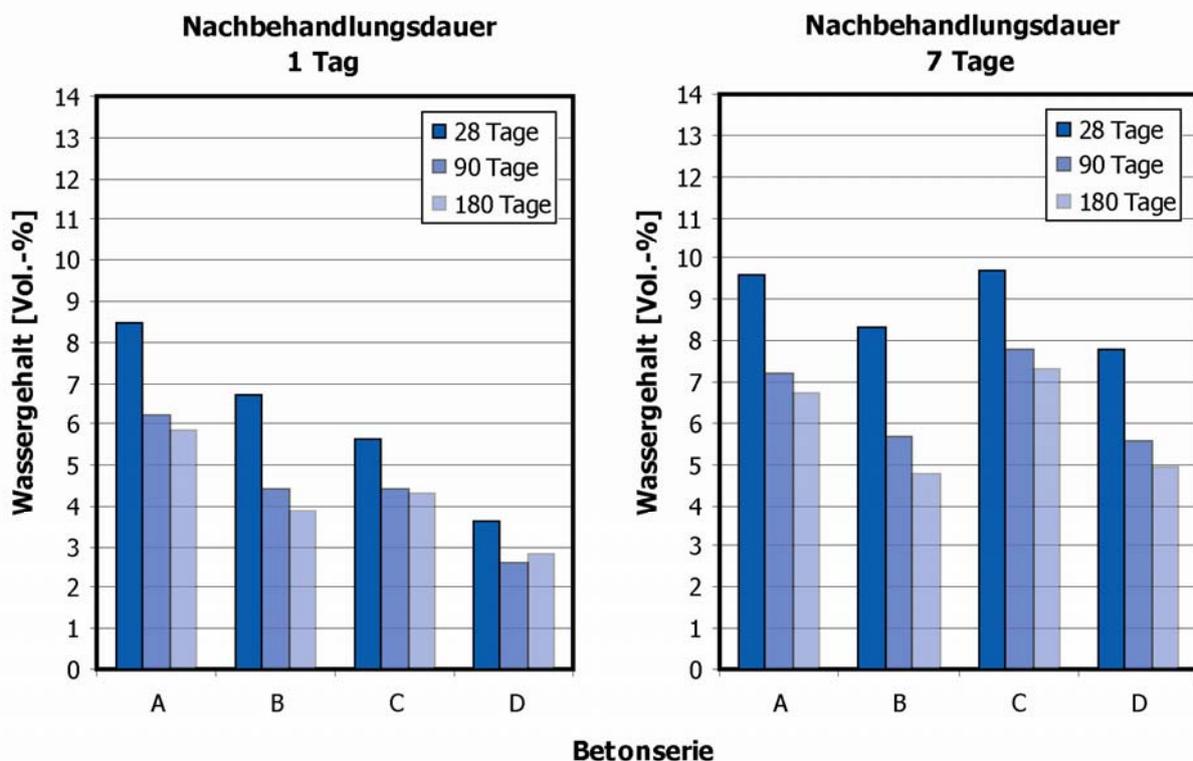


Bild 7.19: Resultierender Wassergehalt bei allen untersuchten Betonserien in Abhängigkeit der Trocknungsdauer nach einer Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 65 % und bei einer feuchten Nachbehandlung von 1 Tag bzw. 7 Tagen

In Bild 7.19 ist der nach der Lagerung resultierende Wassergehalt für alle untersuchten Betonserien in Abhängigkeit der Trocknungsdauer nach einer Lagerung bei einer relativen Luftfeuchte von 65 % und bei einer feuchten Nachbehandlung von 1 bzw. 7 Tagen dargestellt.

Deutlich ist der Effekt der Nachbehandlungsdauer zu sehen, erkennbar an dem geringeren Wassergehalt bei einer Nachbehandlungsdauer von 1 Tag, bei den CEM III-Betonen der Serien C und D im Vergleich zu den CEM I-Betonen der Serien A und B, was auf eine größere Porosität und folglich eine geringere Druckfestigkeit hindeutet.

Vergleicht man die CEM I-Betone A und B bzw. die CEM III-Betone C und D untereinander, erkennt man den Einfluss des Wasserzementwertes auf die Porosität. Dementsprechend weisen die Betonserien A und C mit einem Wasserzementwert von 0,45 einen höheren Wassergehalt im Vergleich zu den Betonserien B und D mit einem Wasserzementwert von 0,65 auf.

Die Ergebnisse der an den verschiedenen Betonen durchgeführten dielektrischen und gravimetrischen Messungen sind am Beispiel der Betonserien A und C in Bild 7.20 bzw. Bild 7.21 für den Nachbehandlungszeitraum von 1 bzw. 7 Tagen in Abhängigkeit vom Betonalter dargestellt.

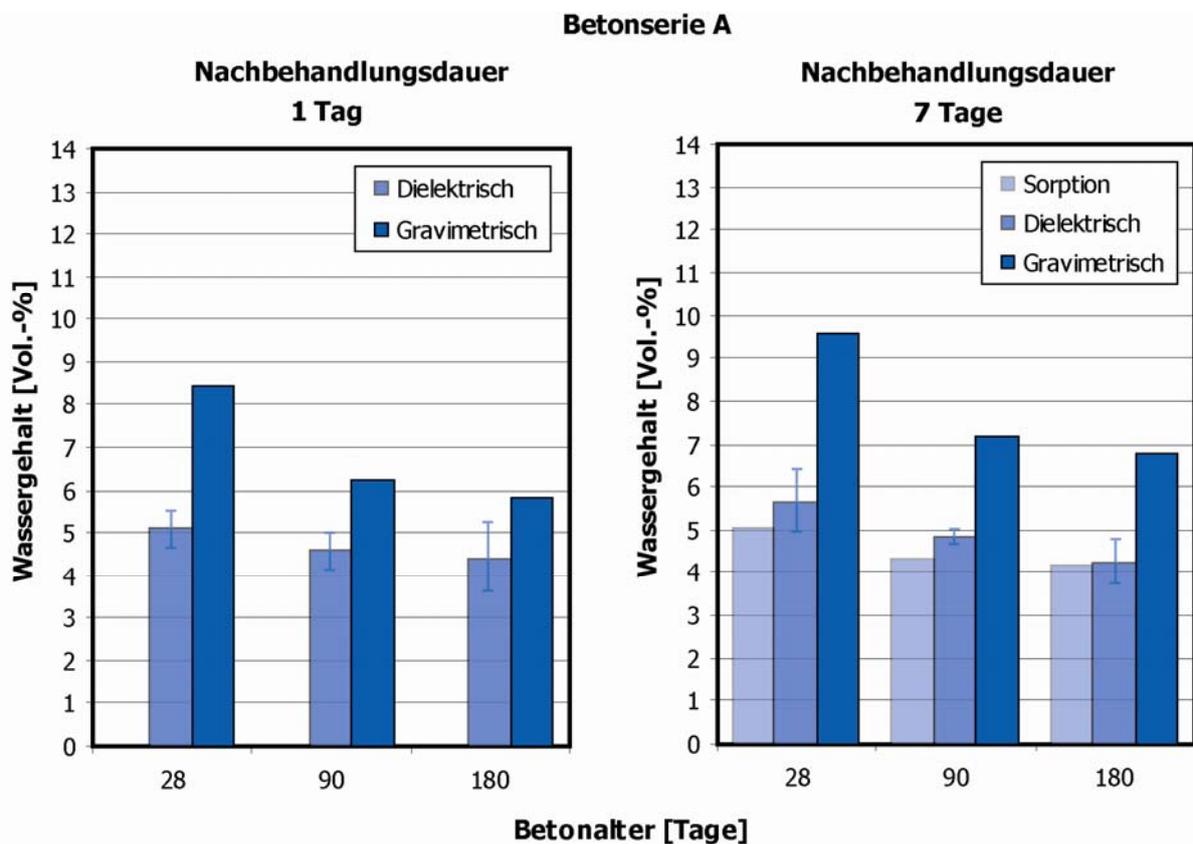


Bild 7.20: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts bei einer Nachbehandlungsdauer von 1 Tag bzw. 7 Tagen am Beispiel der Betonserie A in verschiedenen Altersstufen. Wassergehalt der Betonscheiben mit einer Dicke von 10 mm (Bezeichnung: Sorption)

Bei den Probekörpern mit einer Nachbehandlungsdauer von 1 Tag war es nicht möglich 10 mm dicke Scheiben zu sägen, da sie zum größten Teil zerbröckelt sind. Daher ist in den Bildern lediglich der gravimetrisch bestimmte Wassergehalt der Betonscheiben mit einer Dicke von 10 mm für eine Nachbehandlungsdauer von 7 Tagen angegeben (Sorption). Sämtliche Ergebnisse dieser Versuchsserie zum Einfluss der Nachbehandlung und Lagerung der Proben

(Betone A, B, C und D) bei einer relativen Luftfeuchte von 65 % enthält die Tabelle A 8 im Anhang.

Es zeigt sich erneut, dass die dielektrisch bestimmten Wassergehalte der Proben vorwiegend zwischen den Werten liegen, die gravimetrisch an den Proben mit einer Dicke von 50 mm bzw. 10 mm bestimmt wurden.

Vergleicht man den gravimetrisch bestimmten und dielektrisch gemessenen Wassergehalten bei unterschiedlichem Betonalter erkennt man ihre abnehmende Differenz mit zunehmendem Betonalter. Dies ist einerseits auf die Verflachung der Feuchtigkeitsfront nach Bild 6.8 bei zunehmender Trocknungsdauer, andererseits auf die begrenzte Eindringtiefe des Sensors zurückzuführen.

Die Tatsache, dass die dielektrisch bestimmten Wassergehalte der Proben bei fast allen Messungen vorwiegend zwischen den Werten lagen, die gravimetrisch an den Proben mit einer Dicke von 50 mm bzw. 10 mm bestimmt wurden, spricht erneut für diese neuartige Messmethodik und Ihre Fähigkeit auch Feuchtegradienten zu detektieren. Im folgenden Abschnitt wird nun eine praxistaugliche Möglichkeit zur dielektrischen Erfassung eines Feuchtegradienten vorgestellt und eingehend diskutiert.

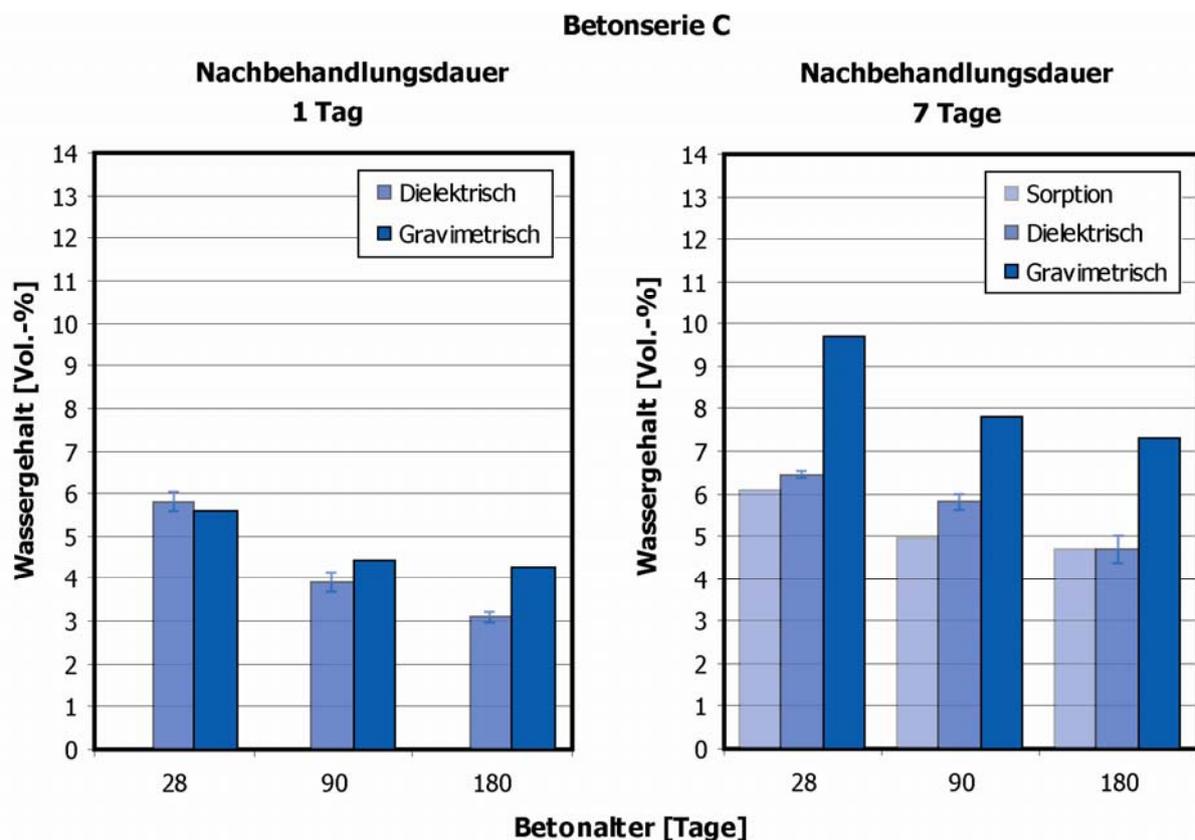


Bild 7.21: Gegenüberstellung des dielektrisch gemessenen und des gravimetrisch bestimmten Wassergehalts bei einer Nachbehandlungsdauer von 1 Tag bzw. 7 Tagen am Beispiel der Betonserie C in verschiedenen Altersstufen. Wassergehalt der Betonscheiben mit einer Dicke von 10 mm (Bezeichnung: Sorption)

7.3 Ungleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integrale Messungen mit vier Sensoren

Die dielektrischen Messungen bei einem vorhandenen Feuchtegradienten wurden mit den Sensoren A, B, C und D nach Abschnitt 5.6.2 vorgenommen. Zum Vergleich wurde der Feuchtegradient gravimetrisch ermittelt. Dazu dienten stets identisch hergestellte und identisch gelagerte zylinderförmige, mantel- und bodenversiegelte Parallelproben mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 30 cm, die zum jeweiligen Prüftermin senkrecht zur Zylinderachse in Scheiben mit einer Dicke von ca. 2 cm gespalten wurden.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte mittels des in Abschnitt 5.6.2 dargestellten Gleichungssystems (Gleichung (5.53)), wobei zur Modellierung der Feuchteverteilung die Arcus-Tangens-Funktion nach Gleichung (5.52) zugrunde gelegt wurde.

Zunächst wurde aber auch hier der integrale Messwert des Wassergehalts für jeden Sensor getrennt nach dem Gleichungssystem (Gleichung (5.51)) bestimmt und danach in das oben genannte Gleichungssystem (Gleichung (5.53)) zur Ermittlung der Regressionsparameter der Arcus-Tangens-Funktion α , β und γ eingesetzt.

7.3.1 Einfluss des Feuchtegehalts

Die dielektrische Bestimmung eines Feuchteprofils erfolgte an Betonplatten der Betonserie I mit den Abmessungen von $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$. Nach 7-tägiger Nachbehandlung wurden die Proben 5-seitig mit Epoxydharz versiegelt und im Freien horizontal (unversiegelte Seite nach oben) und vertikal sowohl mit als auch ohne Überdachung ausgelagert. Die Messungen erfolgten im Freien unter Berücksichtigung der zum Messzeitpunkt vorherrschenden Betontemperatur im Betonalter von 28 und 56 Tagen.

Im Bild 7.22 bzw. Bild 7.23 sind die dielektrisch ermittelten Feuchteverteilungen am Beispiel der vertikal mit bzw. ohne Überdachung (vgl. Bild 6.12) gelagerten Betonplatten der Serie I im Alter von 28 Tagen dargestellt. In beiden Bildern sind die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte der von Zylindern abgespaltenen Betonscheiben (Vergleichsproben) und die mit den Sensoren A, B, C und D dielektrisch bestimmten Feuchtegehalte der Betonplatte eingetragen.

Die Messwerte der Sensoren sind jeweils den sensorspezifischen Eindringtiefen \bar{z} (Schwerpunkte nach Tabelle 5.2) zugeordnet. Ferner sind die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte der von den Zylindern abgespaltenen Betonscheiben jeweils ihrem Abstand zur Betonoberfläche zugeordnet. Die durchgezogenen Linien illustrieren das Ergebnis der Regressionsanalyse nach der Ermittlung der Parameter α , β und γ der Arcus-Tangens-Funktion nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte.

Sämtliche Messergebnisse dieser Versuchsserie (Feuchteprofile der Betonserie I mit einem Wasserzementwert von 0,65 nach horizontaler bzw. vertikaler Plattenlagerung ohne und mit Überdachung) sind in Tabelle A 14 im Anhang zusammengestellt. In Tabelle A 15 sind zusätzlich die an den Vergleichsproben gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben zusammengestellt.

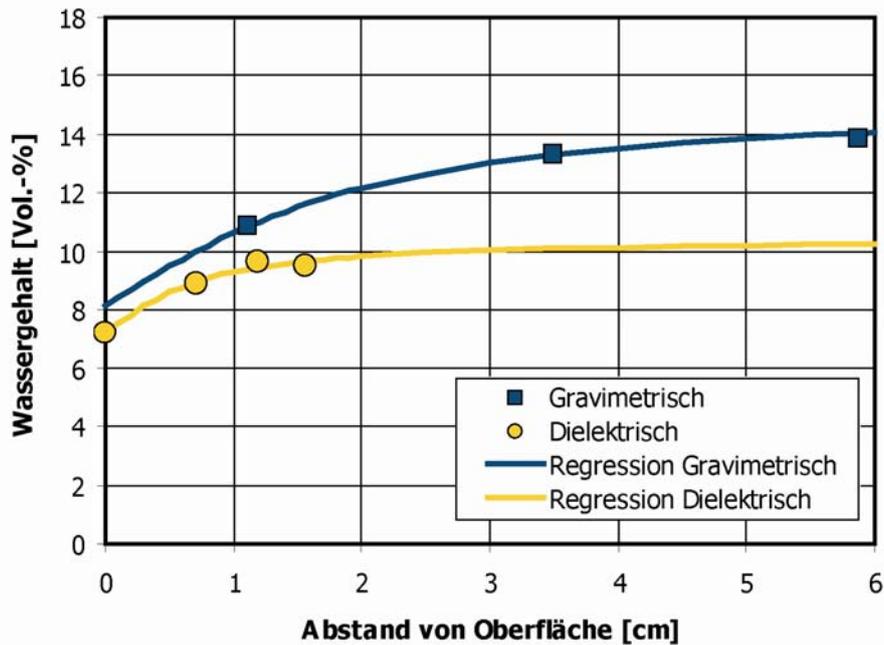


Bild 7.22: Gravimetrisch und dielektrisch ermittelte Feuchteverteilung der vertikal mit Überdachung im Freien gelagerten Betonplatte der Serie I im Alter von 28 Tagen. Die durchgezogenen Linien stellen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte dar

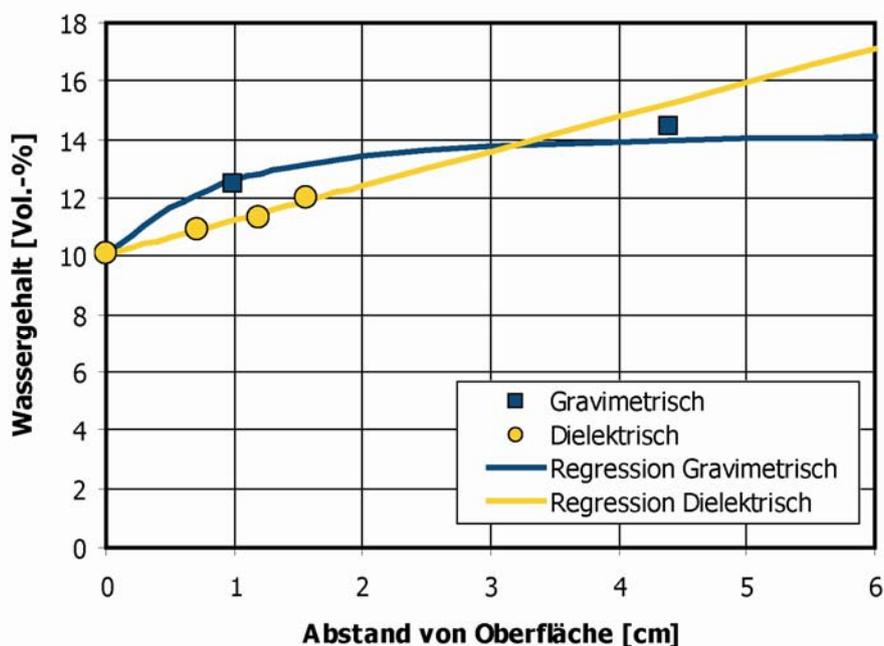


Bild 7.23: Gravimetrisch und dielektrisch ermittelte Feuchteverteilung der vertikal ohne Überdachung im Freien gelagerten Betonplatte der Serie I im Alter von 28 Tagen. Die durchgezogenen Linien stellen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte dar

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die gravimetrischen Regressionsanalysen der abgespaltenen Betonscheiben aus jeweils 5 bis 6 Betonscheiben bzw. Messpunkten (vgl. Tabelle A 10 und Tabelle A 11) berechnet wurden. Durch den gewählten Maßstab auf der Abszisse konnten nicht alle Messpunkte in den Bildern wiedergegeben werden.

Vergleicht man die Regressionskurven der dielektrisch gemessenen bzw. gravimetrisch bestimmten Wassergehalte untereinander, erkennt man eine relativ gute Übereinstimmung der beiden Feuchteverteilungen im oberflächennahen Bereich.

7.3.2 Einfluss des Salzgehalts

Für diese Versuchserie dienten Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 20 cm, die im Anschluss an eine Ofentrocknung bei 50 °C über einen Zeitraum von 10 Tagen NaCl-Lösungen mit Salzkonzentrationen von 0, 60 bzw. 120 g/l kapillar aufnehmen konnten (vgl. Abschnitt 6.4.3 und Bild 6.13).

Im Bild 7.25 bzw. Bild 7.24 sind die dielektrisch ermittelten Feuchteverteilungen am Beispiel der mit einer Salzkonzentration von 60 g/l beaufschlagten Betonwürfel der Serien I bzw. H dargestellt. In beiden Bildern sind die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte der von Zylindern abgespaltenen Betonscheiben (Vergleichsproben) und die mit den Sensoren A, B, C und D dielektrisch bestimmten Feuchtegehalte der Betonwürfel eingetragen.

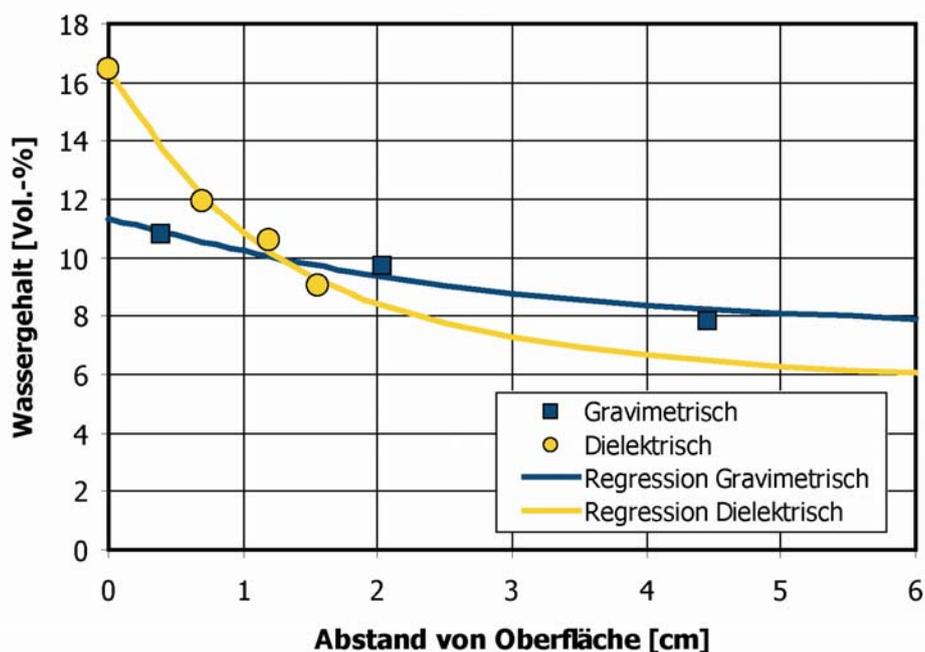


Bild 7.24: Gravimetrisch und dielektrisch ermittelte Feuchteverteilung der Betonwürfel der Serie H nach 10-tägigem kapillarem Saugen einer NaCl-Lösung mit einer Konzentration von 60 g/l. Die durchgezogenen Linien veranschaulichen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte

Die Messwerte der Sensoren sowie die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte der von den Zylindern abgespaltenen Betonscheiben sind jeweils ihrem Abstand zur Betonoberfläche zugeordnet. Die durchgezogenen Linien stellen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach der Ermittlung der Parameter α , β und γ der Arcus-Tangens-Funktion nach Gleichung (5.52)

sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte dar.

Sämtliche Messergebnisse dieser Versuchsserie (Feuchteprofile der Betonserien H und I mit Wasserzementwerten von 0,45 bzw. 0,65 nach kapillarem Saugen) sind in Tabelle A 12 im Anhang zusammengestellt. Zusätzlich sind in Tabelle A 13 die an den Vergleichsproben gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben zusammengestellt.

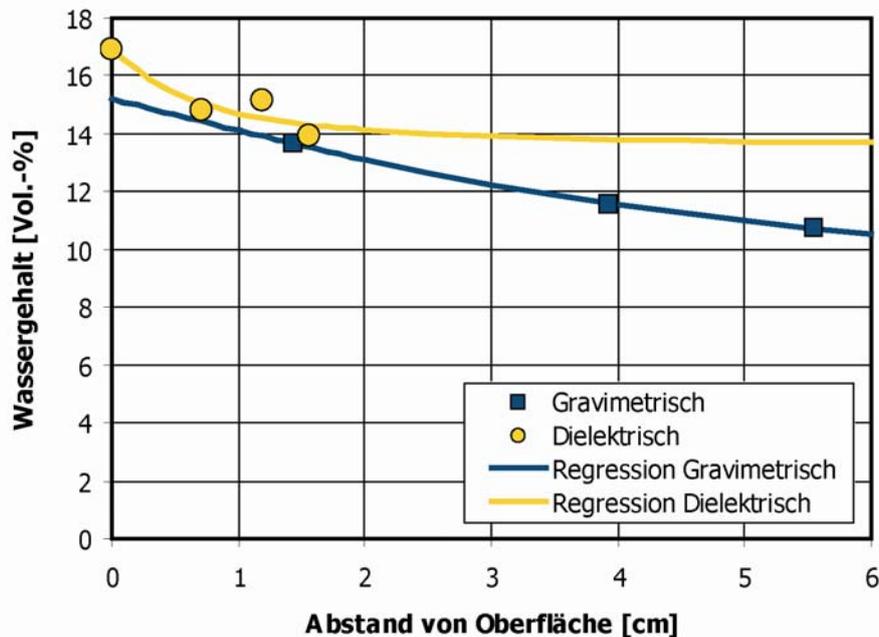


Bild 7.25: Gravimetrisch und dielektrisch ermittelte Feuchteverteilung der Betonwürfel der Serie I nach 10-tägigem kapillarem Saugen einer NaCl-Lösung mit einer Konzentration von 60 g/l. Die durchgezogenen Linien veranschaulichen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte

Auch hier ist eine gute Übereinstimmung der dielektrisch gemessenen bzw. gravimetrisch bestimmten Feuchteverteilungen, insbesondere im oberflächennahen Bereich, offensichtlich.

7.3.3 Einfluss der Nachbehandlungsdauer

Für diese Versuchsserie lagerten die fünfseitig versiegelten Proben (Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm) im Klimaraum bei einer konstanten Temperatur von 20 °C und einer konstanten relativen Feuchte von 65 %. Die Betone der einbezogenen Serien H und I wurden 1 bzw. 7 Tage feucht nachbehandelt. Die dielektrischen Messungen erfolgten im Betonalter von 14, 28 bzw. 56 Tagen.

Sämtliche Messergebnisse dieser Versuchsserie (Feuchteprofile der Betonserien H und I mit Wasserzementwerten von 0,45 bzw. 0,65 mit unterschiedlicher Nachbehandlungs- und Trocknungsdauer) sind in Tabelle A 9 im Anhang zusammengestellt. In Tabelle A 10 und Tabelle A 11 sind zusätzlich die an den Vergleichsproben gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben der Betonserie H bzw. I zusammengestellt.

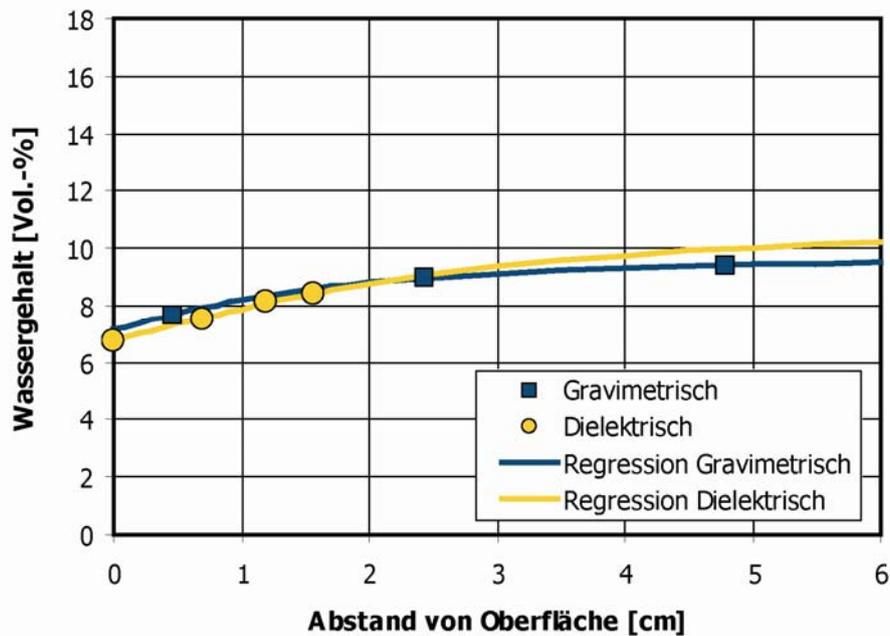


Bild 7.26: Gravimetrisch und dielektrisch ermittelte Feuchteverteilungen der Betonserie H bei einer 7-tägigen Nachbehandlungsdauer im Betonalter von 56 Tagen. Die durchgezogenen Linien veranschaulichen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte

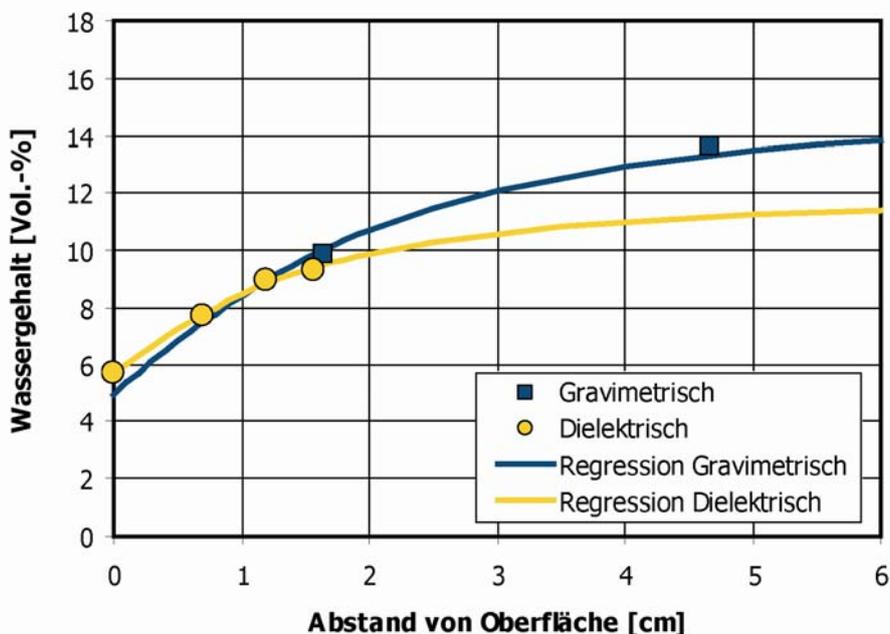


Bild 7.27: Gravimetrisch und dielektrisch ermittelte Feuchteverteilungen der Betonserie I bei einer 7-tägigen Nachbehandlungsdauer im Betonalter von 56 Tagen. Die durchgezogenen Linien veranschaulichen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte

Im Bild 7.26 bzw. Bild 7.27 sind die dielektrisch ermittelten Feuchteverteilungen am Beispiel der Betonserien H bzw. I, die zunächst über einen Zeitraum von 7 Tagen feucht nachbehandelt wurden und danach bis zum Alter von 56 Tagen in einem konstanten Klima (20 °C, 65 % r. F.) trockneten, dargestellt. In beiden Bildern sind die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte der von Zylindern abgespaltenen Betonscheiben (Vergleichsproben) und die mit den Sensoren A, B, C und D dielektrisch bestimmten Feuchtegehalte der Betonwürfel eingetragen. Die Messwerte der Sensoren sind jeweils den sensorspezifischen Eindringtiefen \bar{z} (Schwerpunkte nach Tabelle 5.2) zugeordnet. Die durchgezogenen Linien veranschaulichen das Ergebnis der Regressionsanalyse nach Gleichung (5.52), die nach der Ermittlung der Parameter α , β und γ der Arcus-Tangens-Funktion durch Auflösung des Gleichungssystems (Gleichung (5.53)) sowohl für die dielektrisch gemessenen als auch für die gravimetrisch bestimmten Wassergehalte durchgeführt wurde.

Eine sehr gute Übereinstimmung der dielektrisch gemessenen bzw. gravimetrisch bestimmten Feuchteverteilungen ist ebenfalls bei dieser Versuchsserie ersichtlich.

7.3.4 Diskussion der Messergebnisse zur Erfassung des Feuchtegradienten

Bei der Auswertung der Ergebnisse aller Messserien ist festzustellen, dass das Feuchteprofil mit den dielektrischen Messungen erwartungsgemäß (siehe Tabelle 5.2) bis zu einer Tiefe von 2 cm erfasst werden kann. Dies ist von wesentlicher Bedeutung, da sich insbesondere in diesem Bereich Feuchteänderungen eines Betonbauteils vollziehen, die folglich mit der eingesetzten Methode bestimmt werden können. Feuchteveränderungen in den tieferen Bereichen eines Betonbauteils unterliegen deutlich geringeren Schwankungen. Für diese Bereiche kann die eingesetzte Sensorik allerdings keine Ergebnisse liefern. Dementsprechend sind weitere Arbeiten erforderlich, um dielektrisch ein Feuchteprofil in Tiefenbereichen ≥ 2 cm ermitteln zu können.

Bei der Bewertung der gravimetrisch ermittelten Feuchtegehalte ist darauf hinzuweisen, dass insbesondere dort, wo die dielektrische Bestimmung mit den vier Sensoren vier Messwerte liefert, nämlich im Randbereich von 2 cm, lediglich ein gravimetrischer Feuchtegehalt bestimmt werden konnte. Der Grund ist in der angewandten Spalttechnik der Betonzylinder zu sehen. Hierbei kann eine vollständige Scheibe nur dann erhalten werden, wenn deren Dicke mindestens ca. 2 cm beträgt (vgl. Bild 6.9).

Bei der Extrapolation der Regressionskurve über die Zone hinaus, in der die dielektrischen Messwerte liegen, konnte oft keine Übereinstimmung mit dem gravimetrisch bestimmten Feuchteprofil erreicht werden. Dies war auch aufgrund der begrenzten Eindringtiefen der Sensoren und der vergleichsweise empfindlichen Regressionsanalyse (Streuung der Messwerte) unter Verwendung von Gleichung (5.52) nicht zu erwarten.

In Zukunft sollen Überlegungen angestellt und numerische Untersuchungen durchgeführt werden, inwieweit der Einsatz eines anderen Sensortyps eine Vergrößerung der spezifischen Eindringtiefe bewirkt. Angestrebt ist dabei eine Eindringtiefe von 10 cm.

Zudem ist festzustellen, dass die Heterogenität des Betons zu Messunsicherheiten bei der dielektrischen Ermittlung des integralen Wassergehalts führt. Um das Feuchteprofil auch im Randbereich präziser bestimmen zu können, müssten wesentlich mehr Messungen bei unterschiedlicher Tiefenwirkung der Sensoren durchgeführt werden. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang die weitere Auffächerung der Eindringtiefen des Messfeldes. Dies könnte mit einem einzigen Sensor, wie z. B. dem Sensor D, realisiert werden, indem der Abstand zwischen der Betonoberfläche stufenweise, z. B. mittels Abstandsscheiben oder durch eine Schrittmotorsteuerung, verändert wird. Der Abstandsraum zwischen Sensor- und Betonoberfläche könnte mit einem beliebigen Dielektrikum, vorzugsweise Luft, gefüllt sein. Damit wä-

ren mit einem einzigen Sensor beliebig viele Messungen möglich. Mit dieser größeren Anzahl von Messungen können unvermeidlich auftretende Messunsicherheiten durch ein daraus resultierendes überbestimmtes Gleichungssystem besser ausgeglichen werden. Folglich ist dann die Erfassung einer beliebigen Feuchteverteilung, wie sie bei einer intensiven Befeuchtung oder Trocknung, z. B. durch Gewitterregen bzw. starker Sonnenstrahlung (vgl. Bild 5.12), auftreten kann, mit dieser Messmethode vorstellbar.

7.4 Statistische Auswertung

Es ist grundsätzlich nicht möglich, fehlerfrei zu messen. Durch eine Vielzahl von Ursachen wird die zu messende Größe nicht korrekt erfasst. Die Abweichung eines aus Messungen gewonnenen Wertes vom wahren Wert der Messgröße wird Messabweichung (nach DIN 1319) genannt.

In der für die Messtechnik grundlegenden DIN 1319 [26] wird zwischen diesen beiden Werten unterschieden:

- X_w = wahrer Wert der Messgröße als Ziel der Auswertungen von Messungen der Messgröße; das ist ein "ideeller Wert", der in aller Regel nicht genau bekannt ist.
- X_r = richtiger Wert der Messgröße als "bekannter Wert" für Vergleichszwecke, dessen Abweichung vom wahren Wert für den Vergleichszweck als vernachlässigbar betrachtet wird.

Der richtige Wert ist der Wert, den eine fehlerfreie Messeinrichtung ausgeben würde, ein durch Vergleich mit einem Normal ermittelter (oder als richtig festgelegter) Wert. Zwischen x_w und x_r besteht ein zwar prinzipieller, aber quantitativ unerheblicher Unterschied. Nachfolgend wird der quantitativ eher fassbare Wert x_r verwendet.

Zusammen mit x_a = angezeigter (ausgegebener) Wert liefert der Vergleich von x_a mit x_r die absolute und die relative Abweichung eines Messwertes. Die absolute Abweichung:

$$F = x_a - x_r \quad (6.7)$$

hat einen Betrag, ein Vorzeichen und eine Einheit, nämlich stets dieselbe wie die Messgröße.

Die relative Abweichung:

$$f = \frac{(x_a - x_r)}{x_r} \cdot 100\% \quad (6.8)$$

ist stets ohne Einheit; sie kann positiv oder negativ sein.

Messfehler Fehler können in zwei Kategorien, systematische und zufällige, eingeteilt werden:

- systematische Fehler: Fehler die dadurch entstehen, dass z.B. eine Messapparatur falsch geeicht ist, oder die Proben verunreinigt sind. Systematische Fehler äußern sich in einer (oft) konstanten oder auch proportionalen Verschiebung der Messwerte. Systematische Fehler beeinflussen die Richtigkeit, sie können sich sowohl addieren als auch gegenseitig aufheben.
- zufällige Fehler: entstehen durch zufällige Prozesse während des Messens, z. B. das thermische Rauschen. Zufällige Fehler beeinflussen die Präzision einer Messung und addieren sich immer.

Am einfachsten kann man sich Richtigkeit und Präzision bei einem Dart-Spiel vorstellen. Hat der Spieler eine hohe Richtigkeit, so trifft er im Mittel ins Schwarze. Allerdings hilft ihm das wenig, wenn die Präzision seiner Würfe schlecht ist. Umgekehrt kann ein Spieler mit einer ruhigen Hand eine sehr gute Präzision erzielen, und trotzdem permanent neben das Zentrum der Scheibe treffen.

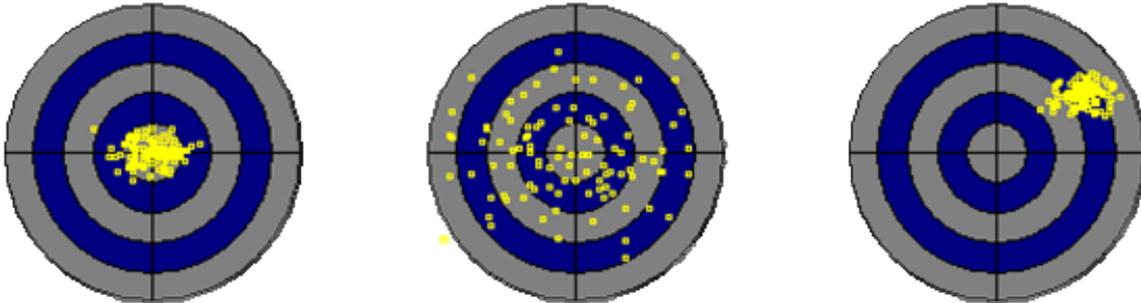


Bild 7.28: Links: Hohe Richtigkeit mit hoher Präzision. Mitte: Hohe Richtigkeit mit geringer Präzision. Rechts: Geringe Richtigkeit mit hoher Präzision. Hier tritt ganz offensichtlich ein systematischer Fehler auf.

Überträgt man diese Unterscheidung zwischen Richtigkeit und Präzision auf die Statistik, so liegt es auf der Hand, dass die Richtigkeit einer Messung durch den Mittelwert beschrieben werden kann, die Präzision durch die Standardabweichung.

7.4.1 Statistische Auswertung mit Mittelwerten aus 12 Messungen

Zur Abschätzung der Messgenauigkeit des verwendeten Messverfahrens wurden für die statistische Auswertung nur die Messergebnisse bei einer gleichmäßigen Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt und integraler Messung mit einem Sensor nach Abschnitt 7.1 herangezogen, da hier offensichtlich ein direkter Vergleich zwischen dem gravimetrisch bestimmten und dem dielektrisch gemessenen Wassergehalt möglich ist.

In Tabelle A 1, Tabelle A 2 und Tabelle A 3 sind alle Messergebnisse (Insgesamt 31) und deren Standardabweichungen dargestellt.

Trägt man die ermittelten Mittelwerte aus 12 dielektrischen Messungen an verschiedenen Stellen einer Probe dem entsprechenden gravimetrisch bestimmten Wassergehalt gegenüber, erhält man, wie in Bild 7.29 dargestellt, eine Regressionsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8855$. Der Mittelwert der Abweichungen für die 31 Messwerte beträgt absolut $\mu_a = + 0,17$ [Vol.-%] bzw. relativ $\mu_r = + 1,32$ [%]. Die Standardabweichung für die 31 Messwerte beträgt absolut $\sigma_a = 0,41$ [Vol.-%] bzw. relativ $\sigma_r = 3,04$ [%].

Zufallsgrößen werden durch Angabe von Mittelwert μ und Standardabweichung σ vollständig beschrieben. Geht man davon aus, dass die Messwerte normal verteilt sind ergibt sich für die aus 12 Messungen gemittelten Messwerte im Intervall $\pm 0,5$ [Vol.-%] eine absolute Abweichungswahrscheinlichkeit von 0,74205 und im Intervall $\pm 1,0$ [Vol.-%] eine absolute Abweichungswahrscheinlichkeit von 0,97752. Das bedeutet, dass 74,205 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ [Vol.-%] und 97,752 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von $\pm 1,0$ [Vol.-%] aufweisen (vgl. Bild 7.30).

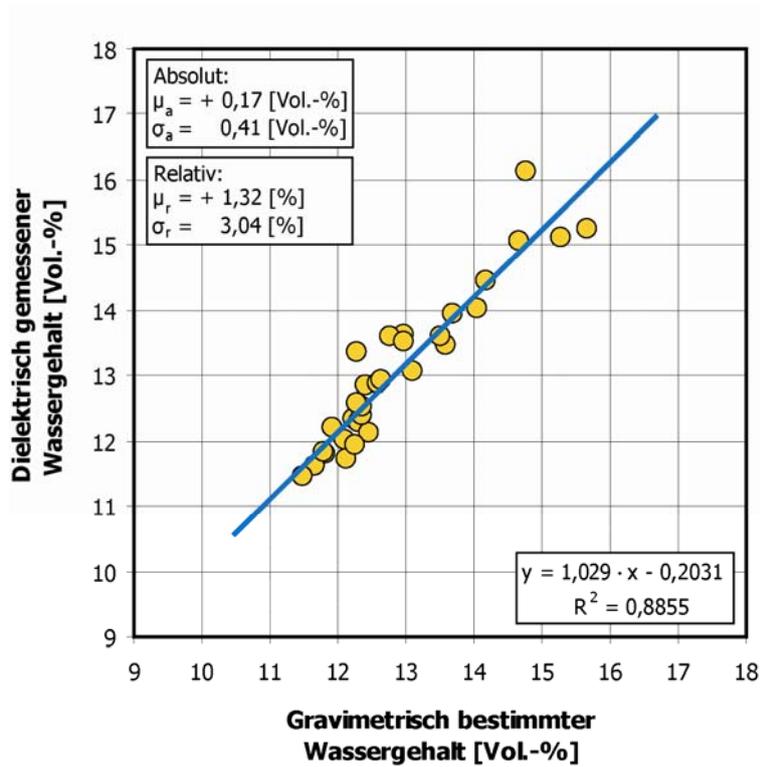


Bild 7.29: Gegenüberstellung zwischen gravimetrisch bestimmten und dielektrisch gemessenen Wassergehalte. Die dielektrisch gemessenen Wassergehalte sind Mittelwerte aus 12 Messungen an verschiedenen Stellen einer Probe. Der gravimetrische Wassergehalt wurde nur einmal für die Probe als Ganzes ermittelt. Das Bild zeigt zusätzlich die Regressionsgerade, deren Gleichung und das Bestimmtheitsmaß. Außerdem sind die absoluten sowie die relativen Mittelwerte der Abweichungen und die dazu gehörigen Standardabweichungen dargestellt

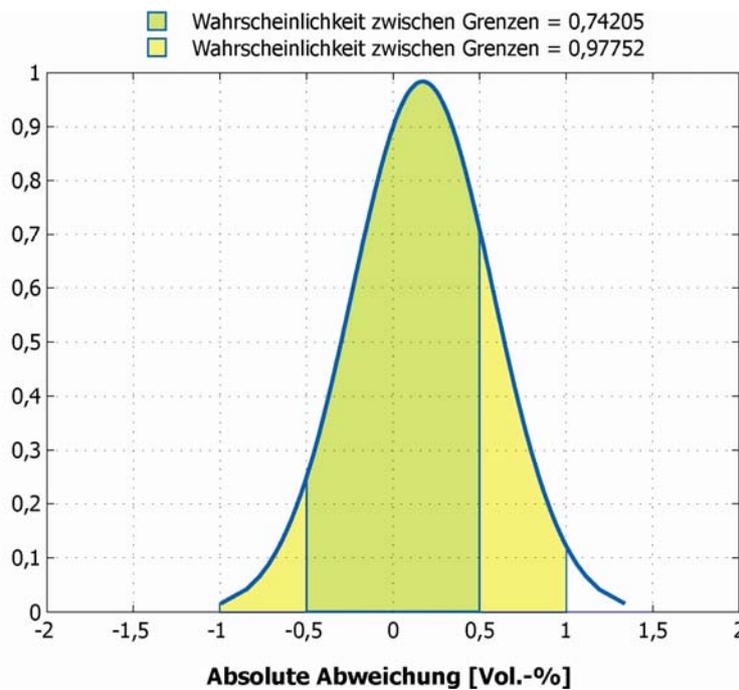


Bild 7.30: Absolute Abweichungswahrscheinlichkeit der aus 12 Messungen gemittelten Messwerte im Intervall $\pm 0,5$ [Vol.-%] und ± 1 [Vol.-%]

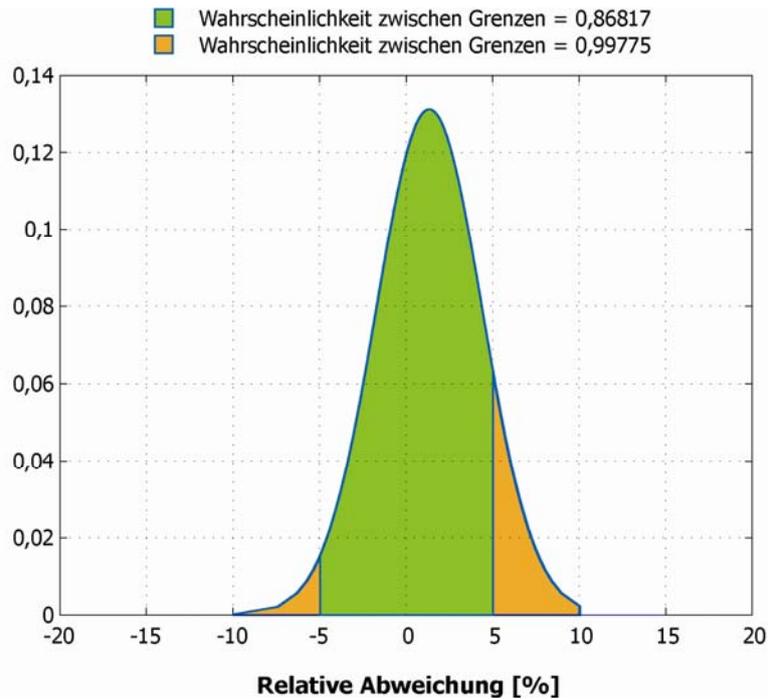


Bild 7.31: Relative Abweichungswahrscheinlichkeit der aus 12 Messungen gemittelten Messwerte im Intervall ± 5 [%] und ± 10 [%]

In Bild 7.31 sind die relativen Messabweichungen für die aus 12 Messungen gemittelten Messwerte im Intervall ± 5 [%] und im Intervall ± 10 [%] dargestellt. Für die Intervalle ± 5 [%] und ± 10 [%] ergeben sich die relative Abweichungswahrscheinlichkeiten 0,86817 bzw. 0,99775. Das bedeutet, dass 86,817 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von ± 5 [%] und 99,775 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von ± 10 [%] aufweisen.

7.4.2 Statistische Auswertung mit Einzelmessungen

Stellt man nun die gemessenen dielektrischen 12 Einzelwerte an verschiedenen Stellen einer Probe dem entsprechenden gravimetrisch bestimmten Wassergehalt einer Probe gegenüber, erhält man, wie in Bild 7.32 dargestellt, eine Regressionsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,7193$. Der Mittelwert der Abweichungen für die $12 \times 31 = 372$ Messwerte beträgt absolut $\mu_a = + 0,17$ [Vol.-%] bzw. relativ $\mu_r = + 1,32$ [%]. Die Standardabweichung für die 372 Messwerte beträgt absolut $\sigma_a = 0,69$ [Vol.-%] bzw. relativ $\sigma_r = 5,38$ [%].

Geht man aus einer Normalverteilung dieser Messgrößen aus, ergeben sich für die 372 Messwerte im Intervall $\pm 0,5$ [Vol.-%] und im Intervall $\pm 1,0$ [Vol.-%] eine absolute Abweichungswahrscheinlichkeit von 0,51622 bzw. 0,83882. Das bedeutet, dass 51,622 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ [Vol.-%] und 83,882 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von $\pm 1,0$ [Vol.-%] aufweisen (vgl. Bild 7.33).

In Bild 7.34 sind die relativen Messabweichungen für 372 Messwerte im Intervall ± 5 [%] und im Intervall ± 10 [%] dargestellt. Für die Intervalle ± 5 [%] und ± 10 [%] ergeben sich die relative Abweichungswahrscheinlichkeiten 0,63299 bzw. 0,92900. Das bedeutet, dass 63,299 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von ± 5 [%] und 92,900 % der Messwerte eine Messgenauigkeit von ± 10 [%] aufweisen.

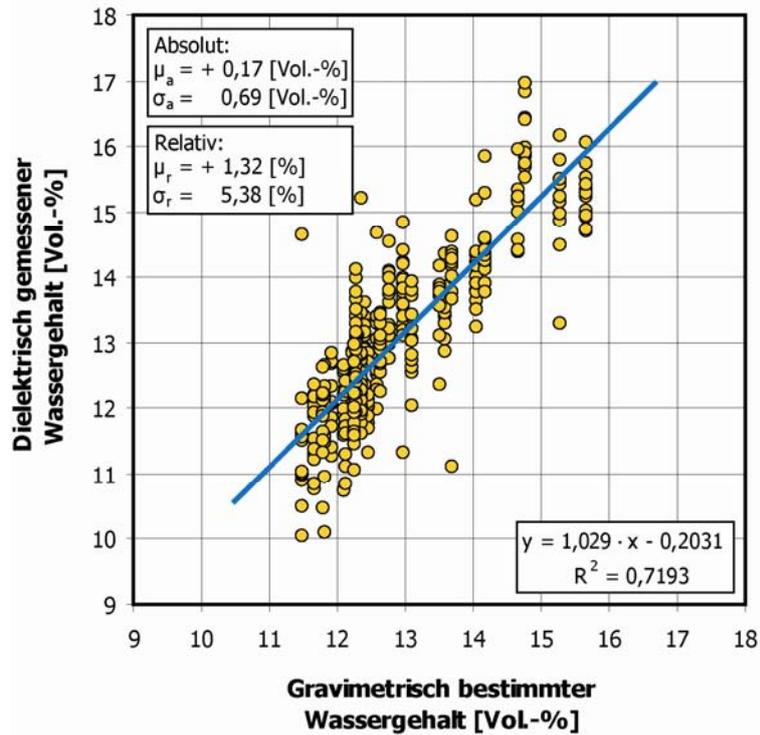


Bild 7.32: Gegenüberstellung zwischen gravimetrisch bestimmten und dielektrisch gemessenen Wassergehalten. Zu jedem gravimetrisch bestimmten Wassergehalt sind die entsprechenden 12 dielektrischen Messungen an verschiedenen Stellen der Probe zugeordnet. Der gravimetrische Wassergehalt wurde nur einmal für die Probe als Ganzes ermittelt. Das Bild zeigt zusätzlich die Regressionsgerade, deren Gleichung und das Bestimmtheitsmaß. Außerdem sind die absoluten sowie die relativen Mittelwerte der Abweichungen und die dazu gehörigen Standardabweichungen dargestellt

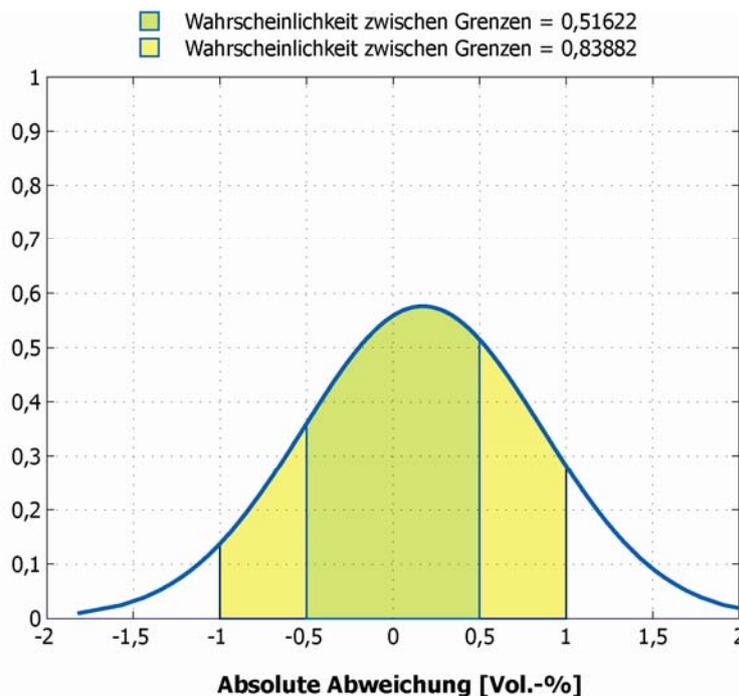


Bild 7.33: Absolute Abweichungswahrscheinlichkeit der 372 Einzelmesswerte im Intervall $\pm 0,5$ [Vol.-%] und ± 1 [Vol.-%]

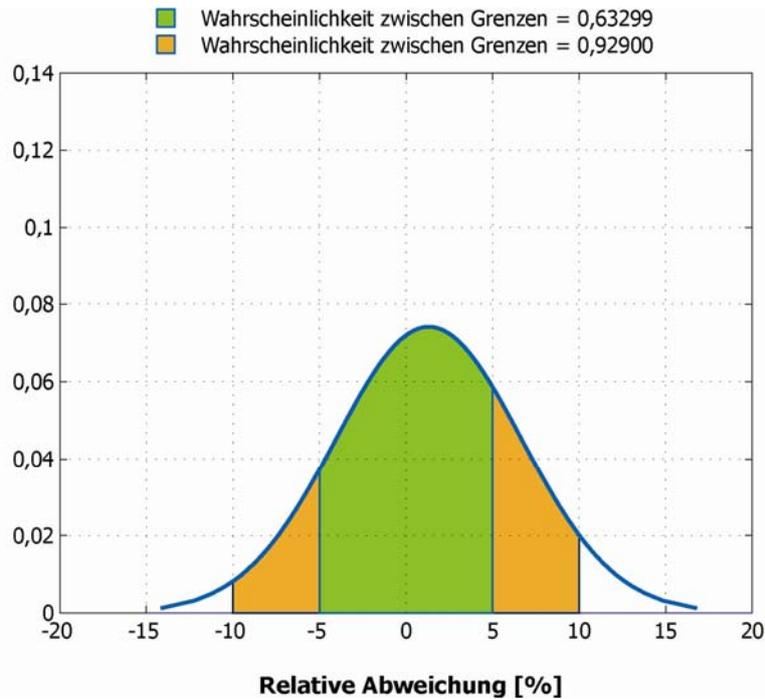


Bild 7.34: Relative Abweichungswahrscheinlichkeit der 372 Einzelmesswerte im Intervall ± 5 [%] und ± 10 [%]

Aufgrund der Materialheterogenität des Betons, kann sich bei der gleichen Probe an der einen Messstelle z. B. eine große Menge Zementmörtel mit einer entsprechend hohen Gesamtporosität und hohem Wassergehalt befinden, während an einer anderen Messstelle z. B. ein großes Zuschlagskorn mit einer entsprechend niedrigen Gesamtporosität und geringem Wassergehalt befinden. Da es praktisch nicht möglich ist zu jeder dielektrisch gemessenen Messstelle einen gravimetrisch bestimmten Wassergehalt zu bestimmen wurde zu allen 12 Messstellen den gravimetrisch bestimmten Wassergehalt der Probe als ganzes zugeordnet. Daher könnten die statischen Ergebnisse in Bild 7.32 als eine Überlagerung der Messabweichungen des Messgerätes und den Messabweichungen, die aus der Betonheterogenität herrühren, erklärt werden.

7.4.3 Abschätzung der Wassergehaltsstreuung in Beton

Bei einer Kombination zweier Zufallsgrößen X und Y und mit der Annahme, dass X und Y stochastisch unabhängig sind, gilt folgende Formel:

$$\sigma^2(X, Y) = \sigma^2(X) + \sigma^2(Y) \quad (6.9)$$

Gleichung (6.9) zeigt, dass bei der Überlagerung von zwei Messwerten die Gesamtstreuung aus den einzelnen Streuungen zusammensetzt, wie die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes aus den Katheten. Es ist erstaunlich, dass der Satz des Pythagoras an dieser Stelle in der Statistik erscheint.

Nimmt man nun an, dass die Streuung der aus 12 Messungen gemittelten Messwerte gegenüber dem gravimetrisch bestimmten Wassergehalt (nach Abschnitt 7.4.1) $\sigma(X)$ nur durch die Messabweichungen des Messgerätes entstehen und die Streuung der 372 dielektrisch gemessenen Einzelwerte gegenüber dem gravimetrisch bestimmten Wassergehalt (nach Abschnitt 7.4.2) $\sigma(X, Y)$ eine Überlagerung von der oben erwähnten Streuung $\sigma(X)$ und der

Streuung $\sigma(Y)$, die durch die lokal ungleichmässige Verteilung des Wassergehalts im Beton herrührt, dann folgt nach Gleichung (6.9) :

$$\sigma^2(Y) = \sigma^2(X, Y) - \sigma^2(X) \quad (6.10)$$

Die Varianz $\sigma^2(Y)$ bzw. die Standardabweichung $\sigma(Y)$ errechnet sich nach Gleichung (6.10) und beträgt absolut $\sigma_a = 0,56$ [Vol.-%] bzw. relativ $\sigma_r = 4,44$ [%]. Der Mittelwert der Abweichungen sind in diesem Fall $\mu_a = 0$ [Vol.-%] bzw. $\mu_r = 0$ [%].

Geht man wieder aus einer Normalverteilung dieser Messwerte aus, ergeben sich im Intervall $\pm 0,5$ [Vol.-%] und im Intervall $\pm 1,0$ [Vol.-%] eine absolute bzw. relative Abweichungswahrscheinlichkeit von 0,62682 bzw. 0,92388. Das bedeutet, dass 62,682 % der Messwerte eine Streuung von $\pm 0,5$ [Vol.-%] und 92,388 % der Messwerte eine Streuung von $\pm 1,0$ [Vol.-%] aufweisen (vgl. Bild 7.35).

In Bild 7.36 sind die relativen Streuungen im Intervall 5 [%] und im Intervall ± 10 [%] dargestellt. Für die Intervalle ± 5 [%] und ± 10 [%] ergeben sich die relative Abweichungswahrscheinlichkeiten 0,73934 bzw. 0,99511. Das bedeutet, dass 73,934 % der Messwerte eine Streuung von ± 5 [%] und 99,511 % der Messwerte eine Streuung von ± 10 [%] aufweisen.

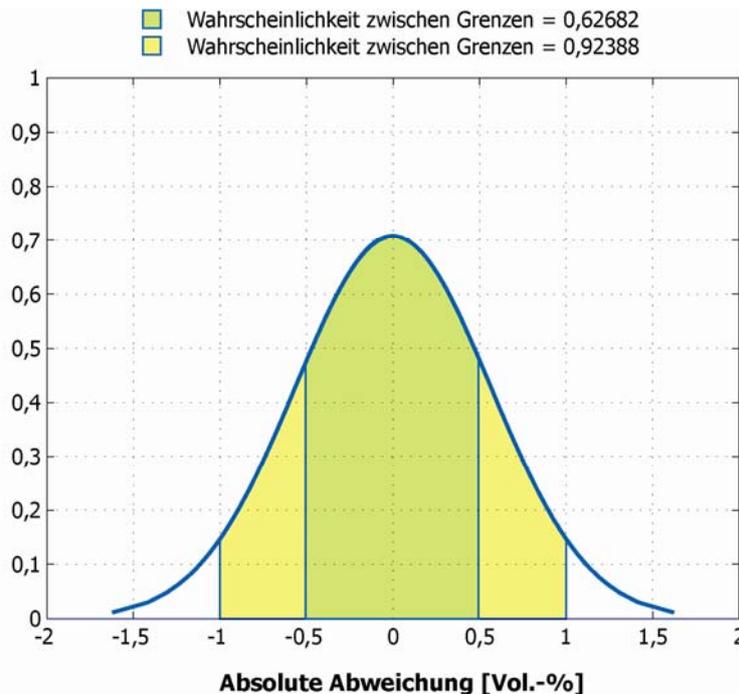


Bild 7.35: Absolute Abweichungswahrscheinlichkeit der Wassergehaltsstreuung im Beton im Intervall $\pm 0,5$ [Vol.-%] und ± 1 [Vol.-%]

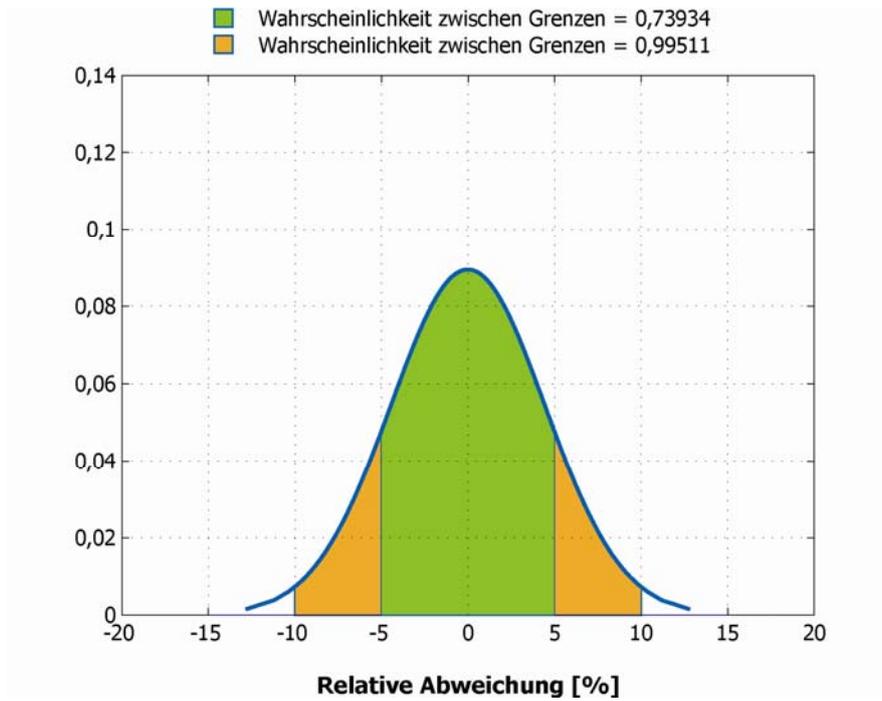


Bild 7.36: Relative Abweichungswahrscheinlichkeit der Wassergehaltsstreuung im Beton im Intervall ± 5 [%] und ± 10 [%]

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges hochfrequentes Messverfahren zur zerstörungsfreien Wassergehaltsbestimmung von Festbeton entwickelt. Seine Erprobung und Weiterentwicklung versprach einen wesentlichen Beitrag zur genaueren zerstörungsfreien Ermittlung des Feuchtegehalts in Randzonen von Beton- und Mörteloberflächen zu liefern.

Wesentliche physikalische Merkmale des neuen Messverfahrens sind die Variation der Messfrequenz, die Erfassung des Real- und Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl, die Einbeziehung des Depolarisationsfaktors sowie die Berücksichtigung des physikalisch gebundenen Wassers und der Temperatur.

Die Alleinstellungsmerkmale des neuen Messverfahrens umfassen die Beschreibung des gesamten Systems durch die Definition von wenigen Parametern, die Isolation der Einflüsse aus Salzgehalt, physikalisch gebundenem Wasser sowie Temperatur. Darüber hinaus können wichtige Information über Salzgehalt bzw. den Salzgehaltgradienten ermittelt werden.

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten an Betonen, die unter definierten Feuchtebedingungen lagerten. Zur Herstellung der Betone wurde ein CEM I- und ein CEM III-Zement verwendet. Der Wasserzementwert der Betone betrug 0,45 bzw. 0,65 und das Größtkorn 8, 16 bzw. 32 mm. Die Feuchtemessungen erfolgten mit dem neuen dielektrischen Messverfahren und zum Vergleich auf gravimetrischem Weg, d. h. durch Trocknung der Proben bei 105 °C bis zu Gewichtskonstanz. Gemessen wurde an Proben, die unter verschiedenen Feuchtebedingungen lagerten bzw. trocknen konnten. Untersuchungsparameter waren dabei die Betontemperatur, das Größtkorn des Betons, der Bewehrungsgrad, der Salzgehalt, das Betonalter (Hydratationsgrad) und die Nachbehandlungsdauer. Bei ausgewählten Prüfserien wurde mit Oberflächensensoren unterschiedlichen Durchmessers gearbeitet, um damit die Möglichkeit zu erkunden, ob über die verschiedene Tiefenwirkung dieser Sensoren zerstörungsfrei ein Feuchteprofil bei Beton dielektrisch erfasst werden kann.

Die ermittelten Versuchsergebnisse zeigen, dass das neue Messverfahren dem herkömmlichen dielektrischen Messverfahren überlegen ist. Gegenüber den bekannten dielektrischen, aber auch den Mikrowellen-Messverfahren, bei denen der Zusammenhang zum Feuchtegehalt durch eine vorhergehende materialspezifische Kalibrierung hergestellt werden muss, kann bei dem neu entwickelten Verfahren auf eine derartige Kalibrierung verzichtet werden. Darüber hinaus werden störende Einflüsse auf die Messgenauigkeit, wie der Einfluss des Salzgehalts des Betons, des physikalisch gebundenen Wassers oder der Temperatur, durch die neuartige Messmethodik ausgeschaltet.

Die neuartige Vorgehensweise und die Berücksichtigung des Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl ermöglichen es, dass auf Eichkurven verzichtet werden kann, um den Feuchtegehalt unterschiedlicher Betone zu erfassen. Der wesentliche physikalische Grund hierfür besteht darin, dass im Bereich der angewendeten Messfrequenzen von 100 bis 500

MHz, trotz gleichem Feuchtegehalts des Betons, unterschiedliche Messsignale auftreten. Aus der Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften des Wassers in Abhängigkeit von der Frequenz kann dann auf den Wassergehalt geschlossen werden. Dabei wird das Messsignal durch die Parameter der Betonzusammensetzung (Bindemittelart, Bindemittelgehalt, w/z-Wert, Größtkorn bis 32 mm) sowie durch den Hydratationsgrad und die Nachbehandlung kaum beeinflusst. Hohe Bewehrungsgrade ($> 0,4\%$) beeinträchtigen das Messsignal so, dass keine exakte Feuchtebestimmung möglich ist.

Die Messungen mit vier Sensoren an einer Messstelle zur Bestimmung eines Feuchteprofils über den Probenquerschnitt ergaben, dass das Feuchteprofil mit den dielektrischen Messungen bis zu einer Tiefe von 2 cm erfasst werden kann. Dies ist von wesentlicher Bedeutung, da sich insbesondere in diesem Bereich Feuchteänderungen eines Betonbauteils vollziehen, die folglich mit der eingesetzten Methode bestimmt werden können.

9 Ausblick

Die Bestimmung des Wassergehalts bzw. Wasserzementwerts von Frischbeton wird in der Praxis häufiger als geeignete Maßnahme zur Qualitätssicherung im Betonbau vereinbart. Das für die entsprechende Prüfung in Frage kommende Messverfahren sollte vor allem hinreichend genaue Ergebnisse bei unterschiedlichen Betonzusammensetzungen liefern und mit einem möglichst geringen zeitlichen und personellen bzw. finanziellen Aufwand verbunden sein.

In der DIN 1048 wird zur Bestimmung des Wassergehalts des Frischbetons der Darrversuch vorgeschlagen, welcher dementsprechend häufig Anwendung in der Praxis findet. Dieses Prüfverfahren liefert zwar zufrieden stellende Ergebnisse, erfordert jedoch in der Durchführung einen nicht unerheblichen Aufwand. Wünschenswert ist daher ein Messverfahren, welches bei vergleichbarer Genauigkeit anhand von Messungen an kleinen, aber repräsentativen Probenmengen die Ermittlung des Wassergehalts in Sekundenschnelle erlaubt. Damit könnte bei Anlieferung des Betons auf der Baustelle sofort eine Entscheidung über die Annahme oder die Zurückweisung erfolgen.



Bild 9.1: Bestimmung des Wassergehalts von Frischbeton durch die Darrmethode nach DIN 52171 [31]

In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm an Frischbeton unter dem Einsatz der neuen Messmethodik durchgeführt [71].

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurde der Wassergehalt von Frischbetonen unterschiedlicher Rezeptur ermittelt. Folgende Parametervariationen fanden Berücksichtigung:

- Wassergehalt: 135 Liter/m³ bis 208 Liter/m³
- Zementgehalt: 215 kg/m³ bis 400 kg/m³ im Abstand von 40 kg/m³
- w/z-Wert: w/z = 0,4 bis 0,65 im Abstand von 0,05
- Zementart: CEM I, CEM II und CEM III
- Zuschlagart: Kies und Splitt
- Größtkorn: 8, 16 und 32 mm
- Zusatzmittel: BV, FM, LP und VZ
- Zusatzstoffe: FA und SF
- Frischbetontemperatur: 5° C bis 30° C (Zielwerte)

Insgesamt wurden 21 Betonmischungen hergestellt. Parallel zu den dielektrischen Messungen erfolgte für jede Betonmischung eine gravimetrische Bestimmung des Wassergehalts mittels Darren nach DIN 52171 [31].

Die ermittelten Versuchsergebnisse zeigten, dass das neue Messverfahren den herkömmlichen dielektrischen Messverfahren überlegen ist. Gegenüber den bekannten dielektrischen, aber auch den Mikrowellen-Messverfahren, bei denen der Zusammenhang zum Feuchtegehalt durch eine vorhergehende materialspezifische Kalibrierung hergestellt werden muss, konnte bei dem neu entwickelten Verfahren auf eine derartige Kalibrierung verzichtet werden. Darüber hinaus wurden störende Einflüsse auf die Messgenauigkeit, wie der Einfluss des Salzgehalts der Porenlösung, durch die neuartige Messmethodik ausgeschaltet.

Durch die neuartige Vorgehensweise und die Berücksichtigung des Imaginärteils der komplexen Permittivitätszahl sind keine Eichkurven erforderlich, um den Feuchtegehalt unterschiedlicher Betone zu erfassen. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass im Bereich der angewendeten Messfrequenzen, bei gleich bleibendem Feuchtegehalt des Betons, unterschiedliche Messsignale auftreten. Aus der Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften des Wassers in Abhängigkeit von der Frequenz kann dann auf den Wassergehalt geschlossen werden. Dabei wird das Messsignal durch die Parameter der Betonzusammensetzung (Bindemittelart, Bindemittelgehalt, w/z-Wert, Größtkorn bis 32 mm) oder den Luftporengehalt kaum beeinflusst bzw. rechnerisch kompensiert.

Der Prototyp für die Wassergehaltsbestimmung von Frischbeton besteht aus einem zylindrischen Behälter (Ø160 x 200 mm) in den der zu messende Frischbeton hinein gefüllt wird. Die Messelektronik, welche sich im Unterbau des Behälters befindet, besteht aus einem analogen Hochfrequenzteil, einem Digitalteil und diverser Hochfrequenzkomponenten. Das Gerät kann sowohl über 220 Volt als auch über Akkus betrieben werden. Als Schnittstellen stehen RS232, USB und Bluetooth zu Verfügung. Das Messgerät wird zurzeit durch eine eigens dafür erstellte Software am PC bzw. Laptop gesteuert.



Bild 9.2: Prototyp für die Wassergehaltsbestimmung von Frischbeton

Mit dem neu entwickelten dielektrischen Messverfahren kann der Wassergehalt eines Frischbetons einfach und schnell mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Für die stichprobenhafte Anwendung auf der Baustelle bzw. bei der Herstellung von Bauteilen ist der hier vorgestellte Messtopf zweckmäßig. Ebenso können mit ihm zuverlässige Feuchtegehaltsmessungen an Zuschlägen durchgeführt werden. Grundsätzlich erscheint es jedoch auch möglich, das entwickelte Messverfahren automatisiert im Prozessablauf bei kontinuierlicher Betonproduktion bzw. Zuschlagbeschickung eines Mischers anzuwenden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Al-Qadi I. L., Hazim, O. A., Su, W., Al-Akhras, N., Riad, S. M.: Variation of Dielectric Properties of Portland Cement Concrete During Curing Time Over Low RF Frequencies. Paper No. 940479, Transportation Research Board 73rd Annual Meeting, Jan 1994.
- [2] Alvaredo, A. M.: Drying Shrinkage and Crack Formation. Building Material Reports No. 5, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, Aedificatio Publishers, December 1994
- [3] ADINA-T: A Finite Element Program for the Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis of Temperatures. Users Manual, Report ARD 92-5, ADINA R&D, Inc. Watertown, MA, December 1992
- [4] Arendt, C.: Trockenlegung–Leitfaden zur Sanierung feuchter Bauwerke. Deutsche Verlags-Anstalt, 1983
- [5] Badmann, R.: Das physikalisch gebundene Wasser des Zementsteins in der Nähe des Gefrierpunktes. Dissertation, Technische Universität München, 1981
- [6] Baldwin, M. G., Morrow, J. C.: Dielectric Behavior of Water Adsorbed on Alumina. The Journal of Chemical Physics, 36, 1591-1593, 1962
- [7] Bartsch, H. J.: Taschenbuch mathematischer Formeln. Verlag Harry Deutsch, Thun-Frankfurt/Main, 1980
- [8] Bažant, Z. P., Najjar, L. J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete. Matériaux et Constructions, 5, 25, 3-15, 1972
- [9] Bažant, Z. P., Najjar, L. J.: Drying of Concrete as a Nonlinear Diffusion Problem. Cement and Concrete Research, 1, 461-473, 1971
- [10] Bier, T. A., Hilsdorf, H. K.: Anwendung der Röntgenkleinwinkelstreuung zur Bestimmung der Porenstruktur von Baustoffen. DFG-Arbeitsbericht, Karlsruhe, 1985

-
- [11] Bier, T. A.: Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1988
- [12] Birks, J. B.: Modern Dielectric Materials. London, Heywood, 1960
- [13] Bjerrum, N.: Structure and Properties of Ice. Dan. Matematisk-Fysiske Meddelelser, 27, Heft 1, 1951
- [14] Brunauer, S., Emmet, P. H., Teller, E.: Adsorption of gases in multimolecular layers. American Chemical Society, 60, 2, 309-319, 1938
- [15] Bungey, J. H., Millard, S. G.: Radar Inspection of Structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures and Buildings, Vol. 99, 173-189, 1993
- [16] CEB - Comité Euro-International du Béton – CEB-FIB Model Code 1990, Bulletin d'Information No. 213/214, Lausanne, May 1993
- [17] Colbeck, S. C.: The Geometry and Permittivity of Snow at High Frequencies. Journal of Applied Physics, 53, 6, 4495-4500, 1982
- [18] Debye, P.: Polare Molekeln. Verlag von S. Hirzel, Leipzig, 1929
- [19] de Loor, G. P.: Dielectric Properties of Heterogeneous Mixtures with a Polar Constituent. Applied Scientific Research, Section B, 11, 310-320, 1964
- [20] de Loor, G. P.: Dielectric Behaviour of Heterogeneous Mixtures. Doctoral Thesis, University of Leiden, The Netherlands, 1956
- [21] Deryagin, B. V., Fedyaikin, N. N.: Doklady Akademii Nauk SSSR, 147, 2, 1463-1466, 1962
- [22] DIN 1045: Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung. Juli 1988
- [23] DIN 1048, Teil 1: Prüfverfahren für Beton; Frischbeton. Juni 1991
- [24] DIN 1048, Teil 5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellter Probekörper. Juni 1991
- [25] DIN 1164: Zement mit besonderen Eigenschaften - Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis. November 2000
- [26] DIN 1319: Grundlagen der Messtechnik. Januar 1995
- [27] DIN 1324: Elektromagnetisches Feld. Mai 1988
- [28] DIN 18121, Teil 1: Untersuchung von Bodenproben-Wassergehalt; Bestimmung durch Ofentrocknung. April 1998

- [29] DIN 50008 Teil 1: Konstantklimat über wässrigen Lösungen. Februar 1981
- [30] DIN 52102: Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität. August 1988
- [31] DIN 52171: Stoffmengen und Mischungsverhältnis im Frischmörtel und Frischbeton, Juli 1942
- [32] Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., El-Rayes, M. A.: Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil – Part II: Dielectric Mixing Models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23, No. 1, pp. 35-46, 1985
- [33] Dransfeld, K., Frisch, H. L., Wood, E. A.: Dielectric Relaxation of Water Adsorbed on γ -Alumina. The Journal of Chemical Physics, 36, 1574-1577, 1962
- [34] Ebert, G., Langhammer, G.: Das dielektrische Verhalten an γ -Aluminiumoxyd sorbierter Wassermolekeln. Kolloid Zeitschrift, 174, 5-20, 1961
- [35] Englert, G., Wittmann, F. H.: Water in Hardened Cement Paste. Materials and Structures, Vol. 1, No. 6, pp. 535-546, 1968
- [36] Englert, G., Wittmann, F. H., Nussbaum, M.: Studium der Bindungsverhältnisse des Wassers im Zementstein. Zement-Kalk-Gips 25, Nr. 4, S. 165-174, 1971
- [37] Freymann, R., Rohmer, R.: Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 233, 951, 1951
- [38] Freymann, M., Freymann, R.: Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 232, 401, 1951
- [39] Fröhlich, H.: Theory of Dielectrics. Oxford, Clarendon Press, 1958
- [40] Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1992
- [41] Göller, A.: Mikrowellenstreuung an körnigen Schüttgütern. Materialfeuchtemessung, Kontakt & Studium, Band 513, Expert-Verlag, 139-144, 1997
- [42] Gunkel, P.: Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente. Beton-Informationen, 1-83, 3-8, 1983
- [43] Hagymassy, J. Jr., Older, I., Yudenfreund, M., Skalny, J., Brunauer, S.: Pore Structure Analysis by Water Vapor Adsorption: III. Analysis of Hydrated Calcium Silicates and Portland Cements. Journal of Colloid and Interface Science, 38, 1972

-
- [44] Hallikainen, M. T., Ulaby, F. T., Abdelrazik, M.: The Dielectric Behaviour of Snow in the 3 to 37 GHz Range. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34, 1329-1339, 1986
- [45] Hallikainen, M. T., Ulaby, F. T., Abdelrazik, M.: Dielectric Properties of Snow in the 3 to 37 GHz Range. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34, 11, 1329-1340, 1986
- [46] Hasted, J. B.: *Aqueous Dielectrics*. London, 1973
- [47] Hasted, J. B.: The Dielectric Properties of Water. *Progress in Dielectrics*, 1, 101-149, 1960
- [48] Helmuth, R. A.: Investigation of the Low Temperature Dynamic Mechanical Response of Hardened Cement Paste. Department of Civil Engineering, Stanford University, Technical Reports No. 154, 1972
- [49] Hilhorst, M. A.: Dielectric Characterisation of Soil. Doctoral Thesis, Wageningen Agriculture University, The Netherlands, 1998
- [50] Hübner, C.: Entwicklung hochfrequenter Messverfahren zur Boden- und Schnee-feuchtebestimmung. Dissertation, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6329, Juli 1999
- [51] Jungwirth, D., Beyer, E., Grübl, P.: Dauerhafte Betonbauwerke. Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis. Düsseldorf. Beton-Verlag GmbH, 1986
- [52] Kaatze, U.: Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature. *Journal of Chemical Engineering Data*, 34, 371-374, 1989
- [53] Kämpf, G., Kohlschütter, H. W.: Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften wasserbeladener Silicagele im Frequenzgebiet 100 Hz-300 kHz. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 294, 10-21, 1958
- [54] Kießl, K.: Kapillarer und Dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation, Universität (GH) Essen, 1983
- [55] Kraszewski, A., Stuchly, M. A., Stuchly, S. S.: ANA Calibration Method for Measurement of Dielectric Properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 32, 385-387, 1983
- [56] Kupfer, K.: *Materialfeuchtemessung*. Kontakt & Studium, Band 513, Expert-Verlag, 1997
- [57] Landau, L. D., Lifshitz, E. M.: *Electrodynamics of Continuous Media*, Pergamon, Oxford, 1975

- [58] Lawrence, C. D.: An Examination of Possible Errors in the Determination of Nitrogen Isotherms on Hydrated Cements. Technical Report 250, Cement and Concrete Association, 1978
- [59] Litvan, G. G., Meyers, R. E.: Surface Area of Cement Paste Conditioned at Various Relative Humidities. Cement and Concrete Research, 13, 1983
- [60] Longuet, P., Burglen, L., Zelwer, A.: La Phase liquide du ciment hydraté. Revue matériaux construction, Heft 676, 35-41, 1973
- [61] Maierhofer, C., Leipold, S. und J. Wöstmann: Strukturuntersuchungen in Beton mit dem Impulsradar. DGZfP (Hrsg.); Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21.-22. Januar 1999 in München, DGZfP-Berichtsband 66-CD, Vortrag 5, 1999
- [62] Maliha, R.: Untersuchungen zur Rissbildung in Fahrbahndecken aus Beton. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2002
- [63] MATLAB: Mathematisches Softwarepaket zur Lösung numerischer Standardprobleme mit der Möglichkeit der graphischen Darstellung der Ergebnisse
- [64] McCafferty, E., Pravidic, V., Zettlemoyer, A. C.: Dielectric Behaviour of Absorbed Water Films on the α -Fe₂O₃ Surface. Trans. Faraday Society, 66, 1720-1731, 1970
- [65] McIntosh, R. L.: Dielectric Behaviour of Physically Adsorbed Gases. Marcel Dekker Inc., New York, 1966
- [66] Mendelson et al.: The effect of Grain Anisotropy on the Electrical Properties of Sedimentary Rocks. Geophysics, Vol. 47, No. 2, 257-263, Feb. 1982
- [67] Meinke, H., Gundlach, F. W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Springer-Verlag, 4. Auflage, 1986
- [68] Mosig, J. R., Besson, J.-C., E., Gex-Fabry, M., Gardiol, F. E.: Reflection of an Open-Ended Coaxial Line and Application to Nondestructive Measurement of Materials. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 30, 46-51, 1981
- [69] Mouhasseb, H.: Patentschrift EP 1292824 „method and device for the determination of at least one parameter of a mixture of a support, water and gas“, 2005
- [70] Müller, H. S.: Baustoffkunde und Konstruktionsbaustoffe. Skriptum zu den Vorlesungen von Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Universität Karlsruhe (TH), 2004/2005
- [71] Müller, H. S., Mouhasseb, H.: Bestimmung des Wassergehalts von Frischbeton, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., 2003

- [72] Nyshadham, A., Sibbald, L., Stuchly, S. S.: Permittivity Measurements Using Open-Ended Sensors and Reference Liquid Calibration-An Uncertainty Analysis. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 40, 305-314, 1992
- [73] Olhoeft, G. R.: Electrical Properties of Rocks. In: *The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks*. Editor: Strens, R. G. J., Wiley, London, 261-278, 1976
- [74] Peschel, G: The Viscosity of Thin Water Films between Two Quartz Glass Plates. *Matériaux et Constructions*, 1, 6, 529-534, 1968
- [75] Pihlajavaara, S. E.: On the Interrelation of the Moisture Content and the Strength of Mature Concrete, and its Reversibility. The State Institute for Technical Research, Finland, Helsinki, 1964
- [76] Polder, D, van Santen, J. H.: The Effective Permeability of Mixtures of Solids. *Physica*, 7, 257-271, 1946
- [77] Poley, J. Ph., Nootboom, J. J., de Waal, P. J.: Use of v.h.f. dielectric measurements for borehole formation analysis. *Log Analyst*, 19, 8-30, 1978
- [78] Pottel, R.: Die komplexe Dielektrizitätskonstante wässriger Lösungen einiger 2-2-wertiger Elektrolyte im Frequenzbereich 0,1 bis 38 GHz. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 69, 363-446, 1965
- [79] Pournaropoulos, C. L., Misra, D. K.: The Co-Axial Aperture Electromagnetic Sensor and its Application in Material Characterization. *Measurement Science Technology*, 8, 1191-1202, 1997
- [80] Powers, T. C., Brownyard, T. L.: *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*. Portland Cement Association. 22, Chicago, 1948
- [81] Rohmer, R.: *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 233, 864, 1951
- [82] Sabri, S., Illston, J. M.: Isothermal Drying Shrinkage and Wetting Swelling of Hardened Cement Paste. *Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete*, Martinus Nijhoff Publishers, 225-34, 1982
- [83] Schwarz, G.: A Theory of the Low-Frequency Dielectric Dispersion of Colloidal Particles in Electrolyte Solution. *Journal of Physics and Chemistry*, 66, 2636-2642, 1962
- [84] Sen, P. N.: Relation of Certain Geometrical Features to the Dielectric Anomaly of Rocks. *Geophysics*, Vol. 46, No. 12, 1714-1720, Dec. 1981
- [85] Sereda, J. P., Feldman, R. F.: Compacts of powdered material as porous bodies for use in sorption studies. *Journal of Applied Chemistry*, 13, 150, 1963

- [86] Setzer, M. J.: Interaction of Water with Hardened Cement Paste. American Concrete Society, Ceramic Transactions, 16, 415-439, 1991
- [87] Sihvola, A.: Electromagnetic mixing formulas and applications. IEE Electromagnetic Waves Series 47, ISBN 0 85296 722 1, 1999
- [88] Sihvola, A. H., Kong, J. A.: Effective Permittivity of dielectric Mixtures. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26, 420-429, 1988
- [89] Smyth, C. P.: Dielectric Behaviour and Structure. McGraw-Hill, New York, 1955
- [90] Stuchly, M. A., Stuchly, S. S.: Coaxial Line Reflection Methods for Measuring Dielectric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies-A Review. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 29, 176-183, 1980
- [91] Thumm, M., Wiesbeck, W., Kern, S.: Hochfrequenzmesstechnik. Verfahren und Messsysteme, B. G. Teubner Stuttgart, Leipzig, 2. Auflage, ISBN 3-519-16360-8, 1998
- [92] van Beek, A., Hilhorst, M. A.: Dielectric Characterization of Young Concrete. Heron, Vol. 44, No. 1, 1999
- [93] Völkl, J. J., Beddoe, R. E., Setzer, M. J.: The Specific Surface of Hardened Cement Paste by Small-Angle X-Ray Scattering: Effect of Moisture Content and Chlorides. Cement and Concrete Research, 17, 89-96, 1987
- [94] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Berichte aus dem Baustoffinstitut, Technische Universität München, Heft 1, 1991
- [95] Weast, R. C.: Handbook of Chemistry and Physics, 63rd Edition, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1982-1983
- [96] Weiland, T.: Solving Maxwell's Equations by Means of the MAFIA CAD-System. International Symposium on Electromagnetic Fields, BISEF88, Beijing, October 19-21, 680-683, 1988
- [97] Weiland, T.: On the Numerical Solution of Maxwell's Equations and Applications in the Field of Accelerator Physics. Particle Accelerators, 15, 245-292, 1984
- [98] Wiesbeck, W.: Hochfrequenztechnik I. Skriptum zur Vorlesung, Institut für Höchsthfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe (TH), 4. Auflage, 1991
- [99] Wilson, D. N.: The Specific Surface of Hardened Portland Cement Paste as Measured by Low-Angle X-Ray Scattering. Doctoral Thesis, Purdue University, 1973

-
- [100] Winslow, D. N., Lovell, C. W.: Measurements of Pore Size Distributions in Cements, Aggregates and Soils. *Powder Technology*, 29, 151-165, 1981
- [101] Wittmann, F. H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. *DafStb-Heft 290*, 45-101, 1977
- [102] Zech, B., Wittmann, F.: Studium des dielektrischen Verhaltens von dünnen adsorbierten Wasserfilmen. *Zeitschrift für physikalische Chemie, Neue Folge*, 92, 45-62, 1974
- [103] Zech, B.: Zum Gefrierverhalten des Wassers im Beton. Dissertation, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, 1981

11 Anhang

Tabelle A 1: Untersuchungsparameter Temperatur bei gleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralen Messwert mit einem Sensor

Gleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Temperatur					
Serie	Probe	Betontemperatur [° C]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]	
				gravimetrisch	dielektrisch
A	A/T-1	2,6	14,7	12,22	12,35 ± 0,29
	A/T-2	9,6	15,3	12,42	12,84 ± 0,51
	A/T-3	20,7	15,5	12,30	12,29 ± 0,33
	A/T-4	34,9	15,1	12,11	12,02 ± 0,53
	A/T-5	51,4	15,1	12,13	11,72 ± 0,52
C	C/T-1	1,6	16,4	12,59	12,88 ± 0,70
	C/T-2	9,9	16,7	12,45	12,12 ± 0,47
	C/T-3	19,9	16,4	12,36	12,40 ± 0,43
	C/T-4	35,0	16,7	12,35	12,53 ± 0,94
	C/T-5	49,4	16,0	11,92	12,20 ± 0,56

Tabelle A 2: Untersuchungsparameter Hydratationsgrad bei gleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integrealem Messwert mit einem Sensor

Gleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Hydratationsgrad					
Serie	Probe	Betonalter [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]	
				gravimetrisch	dielektrisch
B	B/H-1	1,25	14,8	12,98	13,61 ± 0,47
	B/H-2	3,1667	17,0	12,77	13,59 ± 0,54
	B/H-3	7	16,5	12,29	12,59 ± 0,41
	B/H-4	28	16,8	12,27	13,36 ± 0,48
	B/H-5	91	16,2	11,82	11,80 ± 0,74
	B/H-6	182	16,5	11,66	11,63 ± 0,54
D	D/H-1	1,5	16,5	14,77	16,12 ± 0,48
	D/H-2	3,25	16,6	14,06	14,01 ± 0,50
	D/H-3	7	15,5	13,60	13,47 ± 0,40
	D/H-4	28	16,5	12,98	13,52 ± 0,82
	D/H-5	91	16,5	12,26	11,94 ± 0,52
	D/H-6	182	15,9	11,48	11,46 ± 1,15

Tabelle A 3: Untersuchungsparameter Größtkorn des Betons bei gleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integrealem Messwert mit einem Sensor

Gleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Größtkorn des Betons						
Serie	Probe	Größtkorn [mm]	Betonalter [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]	
					gravimetrisch	dielektrisch
E	E/G-1	8	1,875	19,1	15,67	15,24 ± 0,41
	E/G-2		5	18,9	15,29	15,11 ± 0,71
	E/G-3		65	17,8	13,50	13,60 ± 0,47
F	F/G-1	16	1,875	16,9	14,67	15,05 ± 0,44
	F/G-2		5	17,3	14,17	14,46 ± 0,58
	F/G-3		65	15,8	12,65	12,92 ± 0,36
G	G/G-1	32	1,875	16,2	13,69	13,93 ± 0,93
	G/G-2		5	15,5	13,10	13,07 ± 0,57
	G/G-3		65	15,5	11,80	11,83 ± 0,56

Tabelle A 4: Untersuchungsparameter Bewehrungsgrad bei gleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralem Messwert mit einem Sensor

Gleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Bewehrungsgrad						
Serie	Probe	Bewehrungsgrad [%]	Betonalter [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]	
					gravimetrisch	Dielektrisch
H	H/B0-1	0	7	16,5	10,21	9,89
	H/B1-1	0,36			10,40	11,50
	H/B2-1	0,8			10,06	9,40
	H/B3-1	2,5			10,05	8,83
	H/B0-2	0	28	15,5	9,45	10,18
	H/B1-2	0,36			10,10	11,66
	H/B2-2	0,8			9,80	7,02
	H/B3-2	2,5			9,44	8,49
J	J/B0-1	0	7	16,5	9,81	9,91
	J/B1-1	0,36			10,68	11,75
	J/B2-1	0,8			10,12	7,52
	J/B3-1	2,5			10,45	8,23
	J/B0-2	0	28	15,5	10,80	10,77
	J/B1-2	0,36			9,71	10,80
	J/B2-2	0,8			10,89	5,92
	J/B3-2	2,5			9,49	8,35

Tabelle A 5: Untersuchungsparameter Feuchtegehalt bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integrealem Messwert mit einem Sensor

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Feuchtegehalt							
Serie	Probe	Trocknung bei [% r. F.]	Trocknungsdauer [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]		
					Sorption	dielektrisch	gravimetrisch
A	A/F-1	94	210	15,6	8,40	8,63 ± 0,89	11,51
	A/F-2	75	290	15,1	4,69	5,96 ± 1,26	9,22
	A/F-3	54	290	14,6	3,39	4,59 ± 0,30	5,65
	A/F-4	33	290	14,0	2,41	2,75 ± 0,47	3,83
B	B/F-1	94	222	15,3	6,10	7,33 ± 0,18	10,58
	B/F-2	75	302	16,3	4,13	5,06 ± 0,33	7,14
	B/F-3	54	302	16,2	2,83	4,25 ± 0,76	4,28
	B/F-4	33	302	16,1	2,20	2,77 ± 0,32	2,92
C	C/F-1	94	217	15,1	10,86	9,10 ± 0,55	11,75
	C/F-2	75	297	15,2	7,15	6,59 ± 0,89	9,87
	C/F-3	54	297	15,2	4,88	4,91 ± 0,10	7,14
	C/F-4	33	297	15,9	3,69	3,42 ± 0,01	5,16
D	D/F-1	94	215	14,9	9,00	9,07 ± 1,33	11,03
	D/F-2	75	295	16,3	5,13	5,89 ± 0,66	8,35
	D/F-3	54	295	16,2	3,60	4,02 ± 0,94	5,27
	D/F-4	33	295	16,1	2,40	3,00 ± 0,15	3,57

Tabelle A 6: Untersuchungsparameter Salzgehalt (Feuchte Lagerung) bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralen Messwert mit einem Sensor

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Salzgehalt (Feuchte Lagerung)								
Serie	Probe	Vorlagerung in NaCl- Lösung [g/l]	Trocknung bei [% r. F.]	Trocknungsdauer [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]		
						Sorption	dielektrisch	gravimetrisch
A	A/SA-00-1	0	94	226	14,9	7,14	10,56 ± 0,86	13,04
	A/SA-00-2		75	226		5,08	7,56 ± 0,25	10,90
	A/SA-00-3		54	226		3,57	5,62 ± 1,22	8,29
	A/SA-00-4		33	211		2,50	3,89 ± 0,10	4,44
	A/SA-06-1	60	94	226		8,22	10,05 ± 1,21	12,96
	A/SA-06-2		75	226		5,21	7,71 ± 1,10	10,82
	A/SA-06-3		54	226		3,97	5,82 ± 0,42	8,27
	A/SA-06-4		33	211		2,99	4,41 ± 0,35	4,77
	A/SA-12-1	120	94	226		8,42	9,97 ± 0,74	12,19
	A/SA-12-2		75	226		5,21	7,50 ± 0,15	10,99
	A/SA-12-3		54	226		3,75	5,68 ± 0,07	8,44
	A/SA-12-4		33	211		2,81	4,51 ± 0,11	4,56
B	B/SA-00-1	0	94	238	16,2	6,87	8,78 ± 0,18	11,73
	B/SA-00-2		75	238		4,04	6,00 ± 0,15	8,62
	B/SA-00-3		54	238		3,19	5,34 ± 0,22	6,03
	B/SA-00-4		33	223		2,26	3,35 ± 1,01	4,37
	B/SA-06-1	60	94	238		7,57	8,53 ± 0,03	11,86
	B/SA-06-2		75	238		4,31	5,97 ± 1,26	9,29
	B/SA-06-3		54	238		3,39	5,08 ± 0,14	6,19
	B/SA-06-4		33	223		2,34	4,41 ± 0,55	4,37
	B/SA-12-1	120	94	238		7,18	9,06 ± 0,09	12,25
	B/SA-12-2		75	238		5,81	6,57 ± 0,46	9,54
	B/SA-12-3		54	238		3,28	5,55 ± 0,23	6,38
	B/SA-12-4		33	223		2,40	4,53 ± 0,68	4,48

(Fortsetzung Tabelle A 6)								
Serie	Probe	Vorlagerung in NaCl- Lösung [g/l]	Trocknung bei [% r. F.]	Trocknungsdauer [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]		
						Sorption	Dielektrisch	gravimetrisch
C	C/SA-00-1	0	94	233	15,9	10,58	11,97 ± 0,83	13,23
	C/SA-00-2		75	233		6,94	8,81 ± 0,54	11,77
	C/SA-00-3		54	233		5,39	6,72 ± 0,61	9,43
	C/SA-00-4		33	218		4,26	4,44 ± 1,08	7,56
	C/SA-06-1	60	94	233		9,90	9,62 ± 0,50	13,20
	C/SA-06-2		75	233		7,34	7,97 ± 1,32	11,64
	C/SA-06-3		54	233		5,82	6,63 ± 0,44	9,23
	C/SA-06-4		33	218		4,14	5,48 ± 0,01	7,46
	C/SA-12-1	120	94	233		10,12	9,41 ± 0,51	11,76
	C/SA-12-2		75	233		7,59	8,43 ± 0,49	11,47
	C/SA-12-3		54	233		5,99	6,95 ± 0,92	9,53
	C/SA-12-4		33	218		4,37	5,40 ± 0,40	7,63
D	D/SA-00-1	0	94	231	16,1	9,54	11,31 ± 0,04	12,80
	D/SA-00-2		75	231		5,83	7,37 ± 0,67	10,77
	D/SA-00-3		54	231		4,31	5,87 ± 0,35	8,13
	D/SA-00-4		33	216		2,79	3,88 ± 0,62	6,07
	D/SA-06-1	60	94	231		9,43	10,58 ± 0,50	13,16
	D/SA-06-2		75	231		5,84	8,28 ± 0,16	10,75
	D/SA-06-3		54	231		4,08	5,89 ± 0,20	7,73
	D/SA-06-4		33	216		3,91	5,22 ± 0,90	5,84
	D/SA-12-1	120	94	231		9,83	10,58 ± 1,17	13,00
	D/SA-12-2		75	231		5,75	8,25 ± 0,46	10,74
	D/SA-12-3		54	231		4,52	6,71 ± 0,43	8,17
	D/SA-12-4		33	216		3,34	5,16 ± 0,52	6,00

Tabelle A 7: Untersuchungsparameter Salzgehalt (Trockene Lagerung) bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralem Messwert mit einem Sensor

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Salzgehalt (Trockene Lagerung)								
Serie	Probe	Vorlagerung in NaCl-Lösung [g/l]	Trocknung bei [% r. F.]	Trocknungs- dauer [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]		
						Sorption	dielektrisch	gravimetrisch
A	A/SB-00-1	0	65	7	14,9	6,13	6,61 ± 0,09	10,35
	A/SB-00-2			28		4,95	6,09 ± 1,88	9,23
	A/SB-00-3			90		4,67	5,01 ± 1,35	8,01
	A/SB-06-1	60		7		7,14	7,35 ± 0,44	10,60
	A/SB-06-2			28		5,48	6,40 ± 0,13	9,50
	A/SB-06-3			90		5,05	5,56 ± 0,04	8,32
	A/SB-12-1	120		7		7,16	7,67 ± 0,37	10,90
	A/SB-12-2			28		5,45	6,40 ± 0,15	9,77
	A/SB-12-3			90		5,01	5,58 ± 0,03	8,58
B	B/SB-00-1	0	65	7	16,2	5,08	5,29 ± 0,69	8,33
	B/SB-00-2			28		4,04	4,68 ± 0,14	6,96
	B/SB-00-3			90		3,80	3,62 ± 1,09	5,84
	B/SB-06-1	60		7		5,06	5,65 ± 0,20	8,89
	B/SB-06-2			28		4,21	5,21 ± 0,05	7,48
	B/SB-06-3			90		4,02	4,49 ± 0,04	6,28
	B/SB-12-1	120		7		5,55	5,84 ± 0,70	8,91
	B/SB-12-2			28		4,86	5,31 ± 0,25	7,55
	B/SB-12-3			90		4,70	4,83 ± 0,21	6,28
C	C/SB-00-1	0	65	7	15,9	7,58	7,99 ± 0,16	11,20
	C/SB-00-2			28		6,64	7,51 ± 0,64	10,44
	C/SB-00-3			90		6,41	6,50 ± 0,72	9,38
	C/SB-06-1	60		7		7,24	7,87 ± 1,04	10,96
	C/SB-06-2			28		6,79	7,63 ± 0,46	10,26
	C/SB-06-3			90		6,68	6,40 ± 1,03	9,41
	C/SB-12-1	120		7		7,22	7,46 ± 1,20	11,15
	C/SB-12-2			28		6,91	7,22 ± 0,26	10,49
	C/SB-12-3			90		6,84	6,01 ± 0,39	9,68

(Fortsetzung Tabelle A 7)								
Serie	Probe	Vorlagerung in NaCl-Lösung [g/l]	Trocknung bei [% r. F.]	Trocknungs- dauer [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]		
						Sorption	Dielektrisch	gravimetrisch
D	D/SB-00-1	0	65	7	16,1	6,34	6,62 ± 0,21	10,10
	D/SB-00-2			28		5,41	5,91 ± 0,10	9,00
	D/SB-00-3			90		5,19	4,11 ± 0,18	7,54
	D/SB-06-1	60		7		7,05	7,16 ± 0,88	10,23
	D/SB-06-2			28		5,69	6,65 ± 0,93	9,16
	D/SB-06-3			90		5,36	5,48 ± 0,03	7,78
	D/SB-12-1	120		7		6,26	6,47 ± 0,21	10,08
	D/SB-12-2			28		5,47	5,94 ± 0,43	9,04
	D/SB-12-3			90		5,29	5,01 ± 0,42	7,78

Tabelle A 8: Untersuchungsparameter Nachbehandlungsdauer bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integralem Messwert mit einem Sensor

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messwert mit einem Sensor Einflussparameter: Nachbehandlungsdauer								
Serie	Probe	Nachbehandlungsdauer [Tage]	Trocknung bei [% r. F.]	Trocknungsdauer [Tage]	Porosität [Vol.-%]	Wassergehalt [Vol.-%]		
						Sorption	dielektrisch	gravimetrisch
A	A/N-1-1	1	65	27	15,5	-	5,13 ± 0,50	8,44
	A/N-1-2			89	15,4		4,62 ± 0,42	6,21
	A/N-1-3			179	16,0		4,41 ± 0,91	5,85
	A/N-7-1	7		21	15,1	5,04	5,66 ± 0,89	9,59
	A/N-7-2			83	14,7	4,34	4,86 ± 0,05	7,20
	A/N-7-3			173	14,8	4,18	4,22 ± 0,61	6,75
B	B/N-1-1	1	65	27	17,2	-	5,23 ± 1,54	6,72
	B/N-1-2			89	16,0		4,61 ± 0,20	4,41
	B/N-1-3			179	16,9		2,70 ± 0,99	3,89
	B/N-7-1	7		21	16,6	6,01	6,00 ± 0,51	8,30
	B/N-7-2			83	16,4	4,31	5,36 ± 0,60	5,69
	B/N-7-3			173	16,5	3,90	3,44 ± 0,17	4,78
C	C/N-1-1	1	65	27	17,3	-	5,78 ± 0,26	5,62
	C/N-1-2			89	16,8		3,91 ± 0,25	4,43
	C/N-1-3			179	16,4		3,13 ± 0,02	4,30
	C/N-7-1	7		21	16,8	6,08	6,45 ± 0,02	9,70
	C/N-7-2			83	16,1	4,95	5,80 ± 0,18	7,79
	C/N-7-3			173	15,9	4,69	4,68 ± 0,32	7,33
D	D/N-1-1	1	65	27	17,3	-	4,05 ± 1,18	3,62
	D/N-1-2			89	17,2		2,73 ± 0,41	2,62
	D/N-1-3			179	15,8		2,59 ± 0,32	2,81
	D/N-7-1	7		21	16,4	5,20	5,51 ± 0,07	7,79
	D/N-7-2			83	15,8	3,59	3,74 ± 0,11	5,56
	D/N-7-3			173	16,7	3,20	3,12 ± 0,58	4,94

Tabelle A 9: Untersuchungsparameter Nachbehandlungsdauer bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren Einflussparameter: Nachbehandlungsdauer					
Serie	Probe	Nachbehandlungsdauer [Tage]	Betonalter [Tage]	Wassergehalt [Vol.-%]	
				Sensor	dielektrisch
H	H/N1-14	1	14	A	6,68
				B	8,14
				C	8,19
				D	8,99
	H/N1-28		28	A	6,66
				B	7,75
				C	7,68
				D	8,08
	H/N1-56	56	A	5,25	
			B	7,06	
			C	7,49	
			D	7,73	
	H/N7-14	7	14	A	8,33
				B	9,03
				C	8,83
				D	10,09
H/N7-28	28		A	6,47	
			B	8,59	
			C	8,64	
			D	9,48	
H/N7-56	56	A	6,77		
		B	7,52		
		C	8,13		
		D	8,38		

(Fortsetzung Tabelle A 9)					
Serie	Probe	Nachbehandlungsdauer [Tage]	Betonalter [Tage]	Wassergehalt [Vol.-%]	
				Sensor	dielektrisch
I	I/N1-14	1	14	A	1,47
				B	7,68
				C	7,71
				D	8,76
	I/N1-28		28	A	2,51
				B	6,46
				C	7,14
				D	8,05
	I/N1-56	56	A	4,81	
			B	7,06	
			C	7,60	
			D	7,51	
	I/N7-14	7	14	A	7,71
				B	10,14
				C	10,01
				D	10,58
	I/N7-28		28	A	3,73
				B	7,89
C				9,08	
D				9,85	
I/N7-56	56	A	5,67		
		B	7,69		
		C	9,00		
		D	9,31		

Tabelle A 10: Gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben der Betonserie H zum Untersuchungsparameter Nachbehandlungsdauer bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Serie	Probe	Scheibe	Abstand zu Zylinder-Oberfläche [cm]	Gravimetrisch bestimmter Wassergehalt [Vol.-%]
H	H/N1-14	1	0,61	8,63
		2	2,28	10,22
		3	5,61	10,47
		4	9,71	10,41
		5	12,84	10,71
	H/N1-28	1	1,03	8,08
		2	3,60	9,83
		3	6,34	9,78
		4	8,67	10,03
		5	10,67	10,45
		6	12,65	10,11
	H/N1-56	1	1,60	8,76
		2	5,22	10,07
		3	8,42	10,05
		4	10,54	9,77
		5	12,80	9,93
		6	14,91	10,02
	H/N7-14	1	1,12	9,71
		2	3,84	10,28
		3	6,62	10,57
		4	8,98	10,47
		5	11,42	10,09
		6	13,53	10,30
	H/N7-28	1	1,27	9,04
		2	3,54	10,35
		3	6,23	10,03
		4	8,87	9,98
		5	10,57	10,23
		6	12,72	10,00
	H/N7-56	1	0,47	7,68
2		2,43	8,99	
3		4,79	9,39	
4		8,11	9,56	
5		12,82	9,81	

Tabelle A 11: Gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben der Betonserie I zum Untersuchungsparameter Nachbehandlungsdauer bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Serie	Probe	Scheibe	Abstand zu Zylinder-Oberfläche[cm]	Gravimetrisch bestimmter Wassergehalt [Vol.-%]
I	I/N1-14	1	0,20	7,50
		2	1,58	9,39
		3	4,79	13,52
		4	7,20	14,61
		5	8,35	14,80
	I/N1-28	1	1,59	8,37
		2	4,27	11,83
		3	6,27	13,57
		4	8,53	13,55
		5	10,95	14,23
	I/N1-56	1	1,49	7,71
		2	4,08	12,03
		3	6,64	12,72
		4	9,57	13,07
		5	11,66	14,84
		6	14,02	13,47
	I/N7-14	1	1,18	10,91
		2	3,02	13,40
		3	5,43	14,33
		4	8,40	14,68
		5	10,90	15,28
	I/N7-28	1	0,84	9,00
		2	2,91	12,90
		3	5,12	13,97
		4	7,10	14,29
5		8,70	14,72	
I/N7-56	1	1,64	9,85	
	2	4,66	13,65	
	3	7,71	14,25	
	4	10,69	14,72	
	5	13,54	14,91	

Tabelle A 12: Untersuchungsparameter Salzgehalt bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren Einflussparameter: Salzgehalt				
Serie	Probe	Vorlagerung in NaCl-Lösung [g/l]	Wassergehalt [Vol.-%]	
			Sensor	dielektrisch
H	H/S-00	0	A	16,66
			B	12,42
			C	12,15
			D	11,22
	H/S-06	60	A	16,44
			B	11,92
			C	10,58
			D	9,02
	H/S-12	120	A	16,58
			B	13,46
			C	12,73
			D	11,21
I	I/S-00	0	A	17,04
			B	15,58
			C	14,55
			D	14,78
	I/S-06	60	A	16,90
			B	14,81
			C	15,15
			D	13,90
	I/S-12	120	A	17,21
			B	16,88
			C	14,27
			D	13,06

Tabelle A 13: Gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben zum Untersuchungsparameter Salzgehalt bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Serie	Probe	Scheibe	Abstand zu Zylinder-Oberfläche [cm]	Gravimetrisch bestimmter Wassergehalt [Vol.-%]
H	H/S-00	1	0,68	11,48
		2	2,73	9,61
		3	4,82	7,74
		4	7,17	7,80
		5	9,54	7,00
		6	11,93	7,59
	H/S-06	1	0,39	10,80
		2	2,04	9,68
		3	4,46	7,82
		4	8,08	7,57
		5	11,27	7,58
	H/S-12	1	1,56	10,11
		2	4,49	7,82
		3	7,12	7,19
		4	9,59	7,76
5		12,49	7,54	
I	I/S-00	1	1,47	13,26
		2	4,22	11,75
		3	6,66	9,79
		4	8,86	9,40
		5	11,03	9,10
	I/S-06	1	1,44	13,67
		2	3,93	11,54
		3	5,54	10,76
		4	6,62	10,34
		5	9,07	9,57
	I/S-12	1	1,22	12,87
		2	3,32	12,48
		3	5,55	11,06
		4	7,90	9,65
		5	9,72	9,48

Tabelle A 14: Untersuchungsparameter Feuchtegehalt bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren Einflussparameter: Feuchtegehalt						
Serie	Probe	Lagerungsart	Betonalter [Tage]	Betontemperatur [° C]	Wassergehalt [Vol.-%]	
					Sensor	dielektrisch
I	I/HO-28	Horizontal/ Ohne Überdachung	28	11,5	A	12,93
					B	12,25
					C	12,75
					D	12,13
	I/HO-56		56	10	A	13,42
					B	12,55
					C	13,14
					D	12,72
	I/HM-28	Horizontal/ Mit Überdachung	28	11,5	A	7,26
					B	9,42
					C	9,04
					D	9,14
	I/HM-56		56	10	A	10,41
					B	9,75
					C	10,13
					D	10,51
	I/VO-28	Vertikal/ Ohne Überdachung	28	11,5	A	10,07
					B	10,90
					C	11,30
					D	12,00
	I/VO-56		56	10	A	12,14
					B	12,05
					C	12,67
					D	11,87
I/VM-28	Vertikal/ Mit Überdachung	28	11,5	A	7,18	
				B	8,88	
				C	9,67	
				D	9,54	
I/VM-56		56	10	A	10,71	
				B	9,15	
				C	8,52	
				D	10,37	

Tabelle A 15: Gravimetrisch bestimmten Wassergehalte der abgespaltenen Betonscheiben zum Untersuchungsparameter Feuchtegehalt bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung im Probenquerschnitt und integraler Messung mit vier Sensoren

Serie	Probe	Scheibe	Abstand zu Zylinder-Oberfläche [cm]	Gravimetrisch bestimmter Wassergehalt [Vol.-%]
I	I/HO-28	1	1,05	12,76
		2	3,00	13,26
		3	4,67	13,57
		4	6,70	13,43
		5	8,92	13,66
		6	11,09	14,27
	I/HO-56	1	1,14	13,59
		2	3,75	14,17
		3	6,58	14,04
		4	9,64	14,87
		5	13,82	14,93
	I/HM-28	1	1,20	10,04
		2	3,75	12,02
		3	6,69	13,38
		4	9,13	13,59
		5	11,29	13,64
	I/HM-56	1	1,63	11,47
		2	5,28	13,67
		3	9,01	13,96
		4	12,37	14,42
		5	15,04	14,29
	I/VO-28	1	0,98	12,47
		2	4,40	14,44
		3	7,51	14,22
		4	9,18	14,03
		5	10,99	14,07
	I/VO-56	1	1,43	11,91
		2	4,47	13,34
		3	7,68	13,43
		4	11,06	13,62
		5	14,15	14,53
	I/VM-28	1	1,11	10,86
		2	3,49	13,33
		3	5,88	13,86
		4	8,21	14,57
5		11,24	14,54	
I/VM-56	1	1,30	10,33	
	2	4,19	12,81	
	3	8,13	13,27	
	4	12,21	13,72	
	5	15,42	14,31	